



Instituto Politécnico de Tomar

Escola Superior de Tecnologia de Tomar

Afonso Domingos Antunes

KIT DE CONVERSÃO DE VEÍCULOS DE COMBUSTÃO EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

Dissertação de Mestrado

Orientado por:

Professor Doutor Paulo Coelho ESTT IPT

Professor Mestre José Fernandes ESTT IPT

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Tomar
para cumprimento dos requisitos necessários
à obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Eletrotécnica

Resumo

Dada a problemática das alterações climáticas, estando estas associadas às emissões de gases nocivos para a atmosfera por parte de veículos de combustão interna, o veículo elétrico assume-se como opção face ao veículo comum.

O seu desenvolvimento remonta ao início do século XIX com o aparecimento dos primeiros veículos elétricos.

Adotando a plataforma já existente do *Seat Marbella*, vai ser criado um kit de conversão de veículos com motor de combustão interna em veículos elétricos. Este kit será constituído por um motor elétrico assíncrono trifásico, um inversor DC/AC, um conversor DC/DC, e o pack de baterias, para além dos necessários circuitos de controlo. Este tipo de tecnologia já existe no mercado: sendo uma tecnologia fechada não existe grande informação disponível (relativamente aos componentes utilizados), o que conduz a que a margem de evolução seja limitada.

O desenvolvimento de um kit de conversão passa por diversas etapas, nesta Tese deu-se destaque apenas ao dimensionamento geral e ao desenvolvimento dos “órgãos” de comando.

A principal atividade consistiu no desenvolvimento do inversor trifásico para o motor elétrico mais apropriado para esta conversão, o qual será previamente dimensionado

Utilizando o protocolo UART vamos comunicar com o microcontrolador MC3PHAC, utilizando o microcontrolador PIC18F458 criando assim uma arquitetura distribuída de controlo. O microcontrolador MC3PHAC tem a capacidade de, consoante a referência recebida pela comunicação, gerar os sinais de gate apropriados para os transístores de potência do inversor. O PIC18F458 faz a gestão de todos os periféricos que o inversor tem presentes (pedal de acelerador, temperatura do inversor, envio de velocidade e do estado do inversor ao LCD).

Palavras-chave: Veículo elétrico, eficiência, microcontrolador, inversor, mosfet, boost, motor elétrico, caixa de velocidades, UART

Abstract

Due climate changes problems, nocive emission to the atmosphere by the combustion vehicles, the electric vehicle appears as an option to the traditional combustion vehicles.

The development took place at the beginning of the XIX century where the first vehicles appear.

Using an existing platform we are going to built a suitable kit, which convert regular combustion vehicles into electric, this type of technologies already exists nowadays, as a closed technologies, there is not that much information (the used components), which disables better evolution

As this development takes a lot of steps until the final product, on this Thesis our main focus was the global development and command components.

The main activity was on the development of a tree phase inverters which will feed the main motor used on this conversion.

Using UART protocol we are going to communicate with MC3PHAC by the microcontroller PIC18F458. MC3PHAC is capable of generate the mosfet gate signal by a reference received by the UART communication. The PIC18F458 will control all other functions (gas pedal, inverter temperature, all data sent to the LCD).

Key-words: Electric Vehicle, efficiency, microcontroller, inverter, mosfet, boost, electric motor, gearbox, UART

Agradecimentos

Na realização deste projeto de dissertação foram muitos os que se cruzaram no meu caminho a fim de colaborar de forma direta ou indireta. Fica aqui o meu contributo de gratidão para com eles.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Paulo Coelho e Professor Mestre José Fernandes, pela dedicação, empenho e disponibilidade com que acompanharam esta dissertação.

E por fim quero agradecer à minha família e amigos, em especial aos meus pais, irmão e namorada, pelo apoio e incentivo que foram preciosos para a execução deste projeto.

A todos o meu muito obrigado.

Índice

Resumo.....	V
Abstract.....	VII
Agradecimentos	IX
Índice.....	X
Índice de figuras	XII
Índice de tabelas	XIV
Lista de abreviaturas e siglas	XV
1 Introdução.....	1
2 Estado da arte	3
3 Implementação e tecnologias utilizadas.....	13
3.1 Baterias	13
3.2 Modelo dinâmico do veículo.....	14
3.2.1 Modelo energético.....	15
3.2.1.1 Força de resistência ao rolamento	15
3.2.1.2 Força de resistência aerodinâmica.....	16
3.2.1.3 Força de inclinação	16
3.2.1.4 Força de aceleração	17
3.2.1.5 Equação de potência	17
3.3 Caixa de velocidades	21
3.4 Motor elétrico.....	22
3.4.1 Modelo do motor elétrico e controlo de velocidade	24
3.5 Inversor trifásico	27
3.5.1 Desenvolvimento do inversor trifásico	28
3.5.1.1 O MOSFET.....	30
3.6 Conversor DC/DC Boost.....	32
3.6.1 Tipos de funcionamento	36
3.6.1.1 Funcionamento contínuo.....	36
3.6.2 Dimensionamento do conversor boost	38
3.6.2.1 Dimensionamento da bobine e díodo.....	39
3.6.2.2 Dimensionamento do condensador	41
3.7 A fonte de alimentação.....	42
3.8 Microcontrolador PIC18f458.....	43

3.9	Microcontrolador MC3PHAC	48
3.9.1	Algumas funcionalidades do MC3PHAC	49
3.9.2	Comandos MC3PHAC	51
3.10	Protocolo UART	56
3.10.1	Cálculo do checksum	58
4	Arquitetura Implementada	60
4.1	Protocolo UART	60
4.2	O inversor SPWM	60
5	Testes	62
5.1	Modo de operação	68
6	Conclusões e Trabalho Futuro	72
7	Referências	74
8	Anexos	78
8.1	Comunicação com o MC3PHAC utilizando o PICKIT	78
8.2	Código utilizado no PIC18F458 para comunicar com o MC3PHAC	78
8.3	Placas eletrônicas do inversor	88

Índice de figuras

Figura 1: Seat Marbella-----	2
Figura 2: La Jamais Contente -----	3
Figura 3: Phaeton-----	4
Figura 4: Elcar -----	6
Figura 5: GM Ev1 -----	7
Figura 6: Toyota Rav4 elétrico-----	7
Figura 7: Tesla Roadster -----	8
Figura 8: Tesla Model S-----	9
Figura 9: Tesla Model X -----	9
Figura 10: Bmw i3 -----	10
Figura 11: Litle Four-----	10
Figura 12: Veeco RT-----	11
Figura 13: Bateria de gel OPTIMA -----	14
Figura 14: Forças que atuam sobre o veículo -----	14
Figura 15: Modelo dinâmico MatLab-----	18
Figura 16: Rotor Bobinado -----	21
Figura 17: Estator de um motor de indução-----	22
Figura 18: Esquema equivalente aproximado por fase de um motor assíncrono trifásico, que inclui o balanço de potências ativas -----	22
Figura 19: Relação V/F motor assíncrono -----	24
Figura 20: Ondas trifásicas na máquina geradora -----	25
Figura 21: Esquema de potência inversor trifásico -----	26
Figura 22: Circuito de bootstrap -----	28
Figura 23: Esquema do mosfet tipo N -----	28
Figura 24: Relação da tensão de gate, corrente de dreno do mosfet -----	29
Figura 25: Mosfet IRF640-----	30
Figura 26: Mosfet BUK438W 800A -----	30
Figura 27: Esquema elétrico conversor boost-----	31
Figura 28: Gráfico da tensão de saída em relação à tensão de entrada do conversor -----	33
Figura 29: Conversor boost transístor a ON -----	34

Figura 30: Conversor boost transístor a OFF	35
Figura 31: Ripple da corrente na bobine do conversor boost	37
Figura 32: Ripple da tensão de saída do conversor boost	39
Figura 33: Curva típica da descarga da bateria [46]	40
Figura 34: Microcontrolador PIC18F458	41
Figura 35: Placa de controlo e LCD	43
Figura 36: Microcontrolador MC3PHAC	46
Figura 37: Esquema de ligação do MC3PHAC	49
Figura 38: Comandos enviados para parametrização do MC3PHAC via UART	49
Figura 39: Comunicação com o MC3PHAC via PICKIT	50
Figura 40: Fluxograma de funcionamento do MC3PHAC	51
Figura 41: Definição comandos enviado para leitura de dados via UART no MC3PHAC	53
Figura 42: Ficha do tipo DB9	55
Figura 43: Comando de start primeiro byte	57
Figura 44: Resposta vinda do MC3PHAC ao comando de start	58
Figura 45: Obtenção dos sinais SPWM	59
Figura 46: Sinais de SPWM	59
Figura 47: Sinais de gate nos mosfet a 0hz	60
Figura 48: Tensão na carga com a ligação em triângulo nos 50Hz	60
Figura 49: Desfasamento no sinal das gates do mosfet hi/mosfet low com a ligação em triângulo	61
Figura 50: Programação do PIC18F458 com PicKit2	61
Figura 51: Placa de controlo e placa do inversor	62
Figura 52: Vista geral do inversor	62
Figura 53: Inversor em funcionamento	63
Figura 54: Ensaio com máquina assíncrona de indução trifásica	63
Figura 55: Ligação em triângulo máquina as 3500 rpm	64
Figura 56: Tensão neutro fase máquina ligação em estrela as 3000rpm	64
Figura 57: Ligação do inversor numa carga RL	65
Figura 58: Envio do comando de start	65
Figura 59: Resposta do MC3PHAC	66
Figura 60: Resposta em detalhe ao comando de start	66
Figura 61: Falha da placa de controlo do inversor	67

Figura 62: Conversor em funcionamento-----	68
Figura 63: Detalhe da visualização dos comandos no LCD-----	68
Figura 64: Placa geradora dos sinais de pwm para as gates dos mosfet-----	86
Figura 65: Placa de gestão do inversor microcontrolador PIC 18f-----	87
Figura 66: Placa de circuito impresso do circuito de controlo do inversor -----	88
Figura 67: Placa do circuito impresso do sistema de gestão -----	89
Figura 68: Placa do pack de potência do inversor -----	90

Índice de Tabelas

Tabela 1	18
Tabela 2	19
Tabela 3	54
Tabela 4	54

Lista de abreviaturas e siglas

AC	<i>Alternating Current</i> Corrente Alternada
ADC	<i>Analogic to Digital Converter</i> conversor analógico digital
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BPS	<i>Bits per second</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
BMW	Bayern Motor Werk
DC	<i>Direct Current</i> Corrente Contínua
DCE	<i>Data Circuit Equipment</i>
DTE	<i>Data Terminal Equipment</i>
GE	General Electric
GM	General Motors
Hz	Hertz
VCI	Veículos de Combustão Interna
VE	Veículo Elétrico
V/F	Relação tensão frequência
<i>MOSFET</i>	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
EIA	<i>Electronics Industrie Association</i>
ESTT	Escola Superior de Tecnologia de Tomar
EUA	Estados Unidos da América
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RPM	Rotações Por Minuto
SPWM	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
SG	<i>Ground</i> Sinal de massa
SMS	Sistemas de Mobilidade Sustentável
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
TXD	<i>Transmitted Data</i> Transmissão de dados
RXD	<i>Received Data</i> Receção de dados
RTS	<i>Request To Send</i> Pedido para transmitir
CTS	<i>Clear to send</i> Pronto a transmitir
DSR	<i>Data set Ready</i> Dados pronto
DTR	<i>Data Terminal Ready</i> Terminal de Dados Pronto
DCD	<i>Data Carrier Detect</i> deteção da portadora
RI I	<i>Ring Indicator</i> Indicador de chamada
N.m.	Newton metro
kWh	kiloWatt hour kilowatt hora
kW	kilowatt
km/h	kilometer per hour quilometro por hora

1 Introdução

Com o preço dos combustíveis fósseis bastante volátil e a problemática das alterações climáticas, o mundo tem entre braços um grande desafio: mudar a política energética e desligar-se por completo da dependência dos produtos com origem petrolífera. Para isso é necessário que novas alternativas na área dos transportes sejam aperfeiçoadas e se tornem mais acessíveis ao público. O veículo elétrico surge assim como alternativa aos convencionais veículos de combustão interna.

Assim, este projeto tem como objetivo o desenvolvimento sustentável de um kit para a conversão de veículos que utilizam combustíveis fósseis na sua locomoção em veículos elétricos.

Atualmente, no mercado automóvel, as grandes construtoras apenas oferecem ao cliente opções de aquisição de veículos elétricos ou híbridos. Estas tecnologias são completamente fechadas impossibilitando a evolução das mesmas. Porém, existem no mercado pequenas empresas que já oferecem equipamentos para o desenvolvimento da conversão de veículos de combustão interna em elétricos. Paralelamente aos construtores automóveis, estas tecnologias também são fechadas, não existindo opção de evolução ao mesmo tempo que o seu custo de aquisição é elevadíssimo. Foram estas as razões que motivaram a criação deste projeto, tendo como objetivo obter um kit de conversão de baixo custo ao mesmo tempo que são exploradas as tecnologias existentes num veículo desta natureza.

A escolha do veículo para o lançamento deste projeto, recaiu sobre um modelo *Marbella* da marca *Seat*, principalmente devido ao seu baixo custo de aquisição por parte da ESTT. Paralelamente, este veículo reúne características muito interessantes no que toca à relação peso/potência, à versatilidade (nos meios urbanos) e à ergonomia (para os ocupantes). Destacando-se o espaço para cinco ocupantes, este veículo consegue ainda receber evoluções futuras



Figura 1: Seat Marbella

Ao longo dos vários capítulos é descrito o conteúdo desta Tese.

No capítulo 2 (Estado da Arte) é conhecida a evolução que os veículos elétricos tiveram desde o seu aparecimento até aos dias de hoje.

No capítulo 3 são descritas as opções utilizadas e os estudos feitos para a conversão deste veículo em elétrico. O kit terá um pack de baterias de gel, um conversor DC/DC, um inversor DC/AC e o motor elétrico assíncrono trifásico. A opção de manter a caixa de velocidades torna a conversão mais acessível monetariamente.

No capítulo 4 é apresentado todo o trabalho desenvolvido ao nível do inversor trifásico para a alimentação do motor elétrico do veículo. Demonstrados os resultados obtidos das simulações para o conversor DC/DC e resultados obtidos após desenvolvimento do inversor DC/AC.

No capítulo 5 são propostas melhorias para este projeto no futuro.

2 Estado da Arte

O aparecimento do veículo elétrico deu-se por meados do século XIX, a escolha deste tipo de veículo deveu-se ao facto que a energia elétrica estar(nessa altura) nas preferências dos utilizadores de veículos. Esta solução providenciava elevado conforto e fácil manutenção, algo que os carros a gasolina não proporcionavam.

França e Inglaterra foram os pioneiros no desenvolvimento do veículo elétrico nos finais daquele século. Em 1899 é criado o famoso veículo elétrico que conseguiu ultrapassar a barreira dos 100km/h, o "*La Jamais Contente*", coisa que até aí era completamente impossível para os carros de combustão interna existentes.



Figura 2: *La Jamais Contente*

À data deste acontecimento os Estados Unidos da América já possuíam pequenos veículos elétricos, mas este acontecimento fez com que os americanos comesçassem a olhar para o carro elétrico com outra perspetiva.

Em 1902 surge o *Phaeton*, originário da empresa *Wood*, este veículo completamente elétrico tinha uma autonomia de 29 km e uma velocidade máxima de 22 km/h, com um preço de \$2000.



Figura 3: Phaeton

Apesar de estar muito mais avançado tecnologicamente que o veículo de combustão interna em termos de eficiência do conjunto baterias/ motor elétrico, este veículo sofria do problema da autonomia, do tempo que era necessário para recarregar as baterias bem como do preço da energia elétrica. Isto levou a que o veículo elétrico começasse a ficar para segundo plano nas escolhas dos possíveis interessados.

Com a entrada no século XX a América era próspera em veículos, havia três tipos de tecnologia implantada nos veículos, o vapor, elétrico e gasolina. Todas estas tecnologias se destacavam umas das outras, por exemplo o carro a vapor necessitava de pelo menos 45 minutos para o arranque, o carro a gasolina era preciso fazer o arranque manual através de uma manivela e para além disso para ser conduzido tinha de se trabalhar com uma caixa de velocidades, algo desagradável para o condutor americano. Já o veículo elétrico tinha o contra de ter uma baixa autonomia, necessitar de um grande período de paragem para a recarga de baterias, por outro lado a manutenção era extremamente simples, não produzia vibrações nem fumos, características evidentes no outro tipo de veículos.

O declínio do veículo elétrico deveu-se à melhoria das estradas e acessos que, por consequência, requeriam uma autonomia superior em vez da curta deslocação no centro das

idades. A descoberta do petróleo no Texas fez também com que reduzisse o preço da gasolina.

Em 1912 *Charles Kenttering* cria a ignição elétrica. Esta nova tecnologia foi adotada por *Henry Ford* dando início à produção do motor de combustão interna em grande escala. Estes motores eram aplicados nos seus veículos e apresentavam preços a variar dos \$100 aos \$500. Assim, com esta revolução, o veículo elétrico ficou reduzido a pequenas funções de transporte muito específicas.

O veículo elétrico tinha tudo para vencer mas por volta de 1935 a sua existência já era quase nula. Durante cerca de 25 anos a evolução do veículo elétrico esteve adormecida.

Por volta dos anos 60/70 a América viu-se obrigada a alterar as suas políticas em volta dos veículos de combustão. O país apresentava uma grande dependência dos combustíveis de origem petrolífera e, como se isto não bastasse, as questões ambientais também começaram a ter peso na decisão de procurar fontes alternativas de energia.

No início dos anos 60, um veículo de transporte foi desenvolvido pela *Batronic Truck Company*. Este veículo tinha como capacidade de carga cerca de 1000kg, uma velocidade de 40 km/h e uma autonomia de 100km.

Por volta de 1973 esta companhia começa a trabalhar com a GE para o desenvolvimento de um veículo utilitário. De 1973 a 1983 foram produzidos 175 destes veículos que tinham como principal mercado a indústria.

Para além desta empresa outras duas se destacaram no mercado de veículos automóveis elétricos: a *Sebring-Vanguard* e a *Elcar Corporation*. Ambas as empresas criaram pequenos carros para uso particular. Estes carros tinham uma autonomia de 100km e com uma velocidade máxima de 70km/h.



Figura 4: Elcar

No início dos anos 90 diversas diretivas e ações foram tomadas nos Estados Unidos da América e no resto mundo para o uso de fontes de energia renováveis nos veículos automóveis. Além do estado da Califórnia, outros estados adotaram medidas de redução das emissões de carbono por parte dos VCI (Veículo de Combustão Interna).

Com as novas restrições, os construtores automóveis e as empresas de conversão de veículos tornam-se mais ativos na questão do veículo elétrico. Começam a surgir no mercado novas alternativas ao convencional veículo a gasolina e a possibilidade de converter o típico veículo a gasolina em elétrico. Agora, após a conversão, estes novos veículos conseguem atingir as velocidades que lhes permitem circular nas autoestradas e ao mesmo tempo ter intervalos de recarga maiores.

Um exemplo destes veículos é o *Chevrolet S-10* convertido pela *US Electricar*. Os seus motores de corrente alternada, em conjunto com as baterias de ácido-chumbo concediam a este veículo uma autonomia de 100km e um tempo entre recargas de 7 horas.

A *Ford* também entrou nesta corrida apresentando assim o *Ford Ranger pick-up* elétrico. Esta *pick-up* apresentava também uma autonomia de cerca de 100km e uma velocidade máxima de 120km/h.

Em 1996 surge um veículo que marcou a história dos veículos elétricos. Produzido pela *GM (general Motors)*, o modelo *EVI* foi desenvolvido de raiz em vez de construir uma modificação de um veículo já existente. Este veículo de dois passageiros tinha um aspeto desportivo. O seu sistema de propulsão era constituído por um motor elétrico de corrente

alternada com 137 cavalos de potência e 107 N.m de binário com arrefecimento a água, a sua autonomia era de 130 km e tinha uma velocidade máxima de 130km/h quando equipado com baterias de chumbo-ácido.

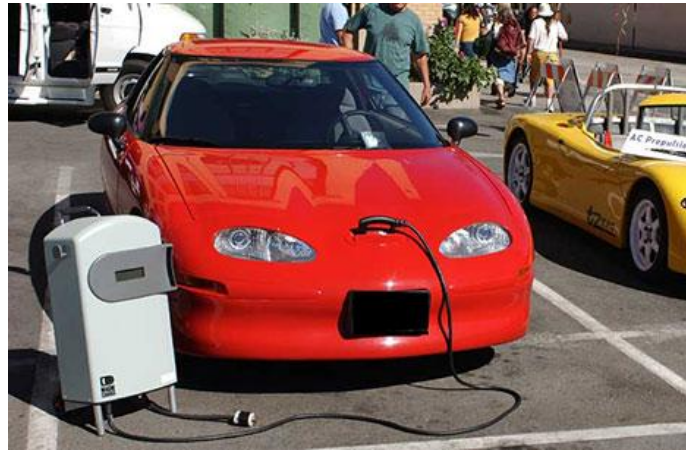


Figura 5: GM Ev1

Por sua vez a *Toyota* apresenta o seu veículo elétrico o *RAV4* em 1998 .Neste mesmo ano a *Honda* apresenta o *EV PLUS* e a *Chrysler* o *EPIC*.



Figura 6: Toyota Rav4 elétrico

Em 2006 foi posto no mercado o *Tesla Roadster*, um carro elétrico do tipo desportivo e o pioneiro dos veículos produzidos pela *Tesla Motors*. A sua autonomia situa-se nos 350 km num único carregamento das suas baterias de iões de lítio. O *Tesla* acelera de 0-100 km/h em 3.9 segundos e tem uma velocidade máxima de 200km/h.



Figura 7: Tesla Roadster

O *Roadster* foi desenvolvido a partir de um veículo já existente: o *Lotus Elise*. A *Lotus* forneceu a tecnologia do desenvolvimento do chassi do *Elise*, com o qual os engenheiros da *Tesla* desenharam um novo chassi. Todos os painéis usam fibra de carbono para diminuir o peso. Esta escolha faz do *Roadster* um dos carros mais baratos feitos completamente em fibra de carbono. Cerca de 10% dos seus componentes provêm do *Lotus Elise*. A fábrica da *Tesla Motor's* na ilha Formosa constrói os motores e os sistemas de armazenamento de energia (ESS) que foram inicialmente construídos na Tailândia durante o desenvolvimento, mas depois foi mudado para São Carlos, na Califórnia após o início da produção. Os chassis são construídos na Noruega. A *SOTIRA*, em *St. Meloir & Pouancé* na França, cria os painéis de fibra de carbono. Os travões do *Roadster* são feitos pela Siemens, na Alemanha bem como os testes de segurança. O motor de propulsão é do tipo, de corrente alternada e a tecnologia de transmissão são das mais avançadas que existe.

Os mais recentes modelos da *Tesla* são os modelos *Model S* e *Model X*.



Figura 8: Tesla Model S



Figura 9: Tesla Model X

Uma autonomia anunciada que pode atingir os 430 quilómetros com o pack de baterias de 40kWh a 85kw fazem destes novos modelos veículos elétricos extremamente robustos. A propulsão está entregue a um motor trifásico de 420 cavalos[39].

Em 2013 a alemã BMW surge com a nova gama I (veículos elétricos e híbridos), o modelo de lançamento é um pequeno citadino com uma autonomia de 160km. Este VE está equipado com um motor elétrico de 125kw, o fornecimento de energia ao motor elétrico cabe às baterias de lítio de alta tensão, que segundo o construtor garante um tempo de vida útil de 100.000km.



Foto 10: Bmw i3

Em Portugal já existem alguns projetos interessantes de veículos elétricos como é o exemplo do pequeno *Little Four*. Este veículo é produzido em série em Portugal pela SMS (Sistemas de Mobilidade Sustentável). Tem uma autonomia de 100km gastando apenas 0.8€ para os percorrer.



Figura 11: Little Four

Também em Portugal um veículo elétrico de referência atual é o Veeco. Este pequeno *inverted trike* (veículo de três rodas) marca pela sua ousadia. Tal como o nome indica é uma *trike* invertida (duas rodas na frente e uma na traseira). A transmissão é feita por um motor elétrico trifásico assíncrono de 30kW alimentado por um pack de baterias de lítio, conseguindo uma autonomia que pode ir até 400 km.



Figura 12: Veeco RT

Na união europeia e em particular em Portugal está a decorrer o programa *ENE2020* [37] referente à eficiência energética. Este programa incentiva a que seja adotado o uso do veículo elétrico bem como a melhoria dos postos de abastecimento destinados a estes veículos.

Com escândalos associados a emissões de gases de escape a ameaçar as construtoras automóveis, o futuro prevê uma generalização do veículo elétrico, como preveem os relatórios de vendas de automóveis elétricos no futuro [38].

3 Implementação e tecnologias utilizadas

O sistema de propulsão vai estar a cargo de um motor elétrico assíncrono trifásico, a principal razão da escolha deste tipo de motor deve-se ao baixo custo de manutenção comparativamente, por exemplo com os motores elétricos de corrente contínua. A eficiência destas máquinas ronda os 90% [14], já o motor de C.I (Combustão Interna) tem rendimentos na ordem de 30% [14]. Uma das grandes desvantagens do motor elétrico assíncrono trifásico é, quando ligado à rede elétrica e fazendo um arranque direto, este a baixa rotação tem um binário muito reduzido. Neste projeto, vai ser desenvolvido um inversor trifásico para que se consiga anular esta característica de reduzido binário a baixa rotação, situação não desejável para este projeto, pretende-se manter sempre constante o binário ao longo do seu regime útil de funcionamento do motor elétrico.

Neste estudo a opção do motor elétrico recaiu sobre o motor elétrico *ANSALDO* 15kW com se verifica no capítulo (3.2.1.5) e tabela 1, os dados do motor encontram-se em anexo [40]. Assim todo o estudo teve como base este motor.

3.1 Baterias

As baterias são os elementos que fornecem a energia ao veículo elétrico, a escolha das baterias a instalar nesta conversão foram as baterias do tipo *YELLOW TOP* do fabricante *OPTIMA*, o pack instalado para a primeira fase da conversão contará com 14 baterias de 12V (13.1V à plena carga segundo o fabricante) 55A.h, ficando dispostas em associações de série/paralelo. Assim, termos 7 baterias em série, em paralelo com as restantes 7 baterias, com este tipo de associação este pack terá uma potência instalada de 10.0 kW.h.

As baterias vão ser distribuídas no veículo por forma a não comprometer o comportamento dinâmico do mesmo. Como as baterias escolhidas tem o eletrólito à base de gel, faz com que em caso de acidente o derrame de eletrólito seja menos perigoso comparativamente por exemplo às baterias de ácido/chumbo, exemplo disso num projeto já feito na ESTT [54], as baterias foram colocadas numa posição lateral mantendo a sua operacionalidade na mesma. Além desta característica segundo o fabricante este tipo de baterias apresentam uma maior resistência a vibrações. Em comparação as baterias de gel têm um tempo de vida superior às já conhecidas baterias de ácido/chumbo.



Figura 13: Bateria de gel OPTIMA

3.2 Modelo dinâmico do veículo

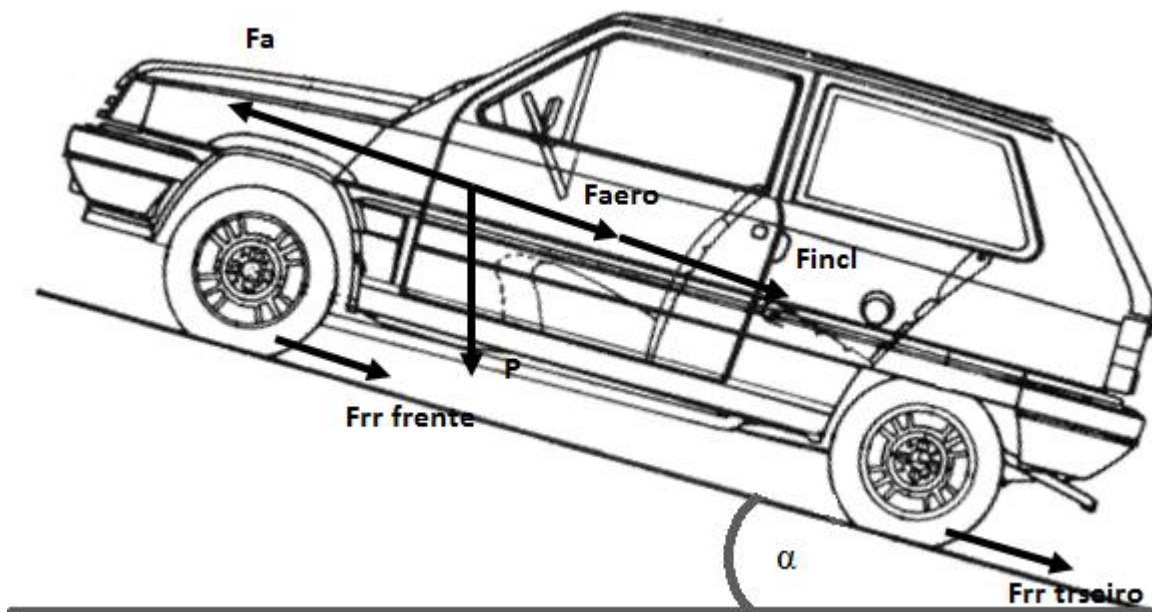


Figura 14: Forças que atuam sobre o veículo [40]

A figura 14 representa de uma forma sistemática todas as forças envolvidas num veículo. De modo a obtermos a situação mais “problemática” optou-se por representar o veículo num plano inclinado com ângulo α .

Segundo a figura 14 várias são as variáveis que são representadas, em que V representa a velocidade linear do veículo, P o peso do veículo, $F_{rr\ frente}$ e $F_{rr\ traseiro}$ a força de resistência

ao rolamento em cada eixo do veículo, F_{aero} representa a força de resistência aerodinâmica e F_{inc} a força de inclinação.[40].

Nas situações de repouso ou em movimento, o veículo está sujeito a vários tipos de forças. Para um bom desempenho dos veículos elétricos torna-se necessário este estudo.

Este tipo de estudo consiste em estudar todas as forças que são aplicadas no veículo, conseguindo assim desta forma determinar o tipo de motor necessário, a potência das baterias a instalar no veículo, a sua autonomia, velocidade máxima entre outros aspetos.

Nesta conversão foi mantida a caixa de velocidades, este elemento torna-se fundamental pois usando a caixa de velocidade conseguimos usar um motor de potência mais reduzida, poupando nos custos, aquisição e transformação do veículo para o uso sem caixa. [14]

3.2.1 Modelo energético do veículo

O modelo do energético do veículo é deveras importante, dado que traduz todas as forças a que o veículo está sujeito, como tal é de extrema importância o seu cálculo, pelo que a partir deste, consegue-se determinar as necessidades energéticas que o veículo necessita nas mais diversas condições de funcionamento.

3.2.1.1 Força de resistência ao rolamento

A força de resistência ao rolamento em qualquer veículo é influenciada por vários fatores, nomeadamente o tipo de pneu, a pressão de enchimento, peso de veículo. O pneu como é baseado em borracha sofre deformação, esta deformação causa no rolamento fricção, estas duas características absorvem energia quanto o veículo se encontra em movimento e consequentemente esta energia é dissipada para o ambiente em forma de calor.

Para o cálculo da força de resistência ao rolamento iremos utilizar a seguinte equação: [14] [39] [46]

$$F_{rr} = C_r \times m \times \cos \alpha \quad (1)$$

Onde C_r indica o coeficiente de resistência ao rolamento, (este coeficiente tem particularidade de depender do tipo de superfície em que o veículo circula), m indica massa do veículo, e no caso do veículo se encontrar num plano inclinado o fator co-seno tem influência sobre o peso em cada eixo do veículo, sendo α o ângulo de inclinação com a horizontal. A determinação do coeficiente C_r , pode ser obtida realizando o seguinte ensaio: puxando o veículo a baixa velocidade e medindo-se a força necessária para que este se mova obtém-se este coeficiente. Tipicamente para veículo elétricos o coeficiente dos pneus utilizados situa-se em torno dos 0,005. [53]

3.2.1.2 Força de resistência aerodinâmica

A resistência aerodinâmica está presente sempre que qualquer corpo se move. A fricção do ar sobre a superfície do veículo cria a resistência aerodinâmica, esta força depende da forma do veículo, da densidade do ar e da velocidade a que o veículo se desloca. Assim a equação da resistência aerodinâmica resume-se a: [14] [39]:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \times \rho \times C_d \times A_f \times v^2 \quad (2)$$

Em que:

C_d - caracteriza o coeficiente aerodinâmico,

A_f - área frontal do veículo

V - a velocidade a que o veículo se desloca.

ρ - densidade do ar (kg/m^3)

Da definição matemática conclui-se que esta força aumenta quadraticamente com a velocidade a que o veículo se desloca.

3.2.1.3 Força de inclinação

Durante um percurso em que o veículo se encontra no plano não horizontal, este está sujeito à ação da força de inclinação. Esta força pode contribuir positivamente na descida ou negativamente na subida para as resultantes das forças que atuam no movimento, e é dada por: [14] [39] [46]

$$F_{incl} = m \times g \times \sin \alpha \quad (3)$$

A força de inclinação é caracterizada por duas variáveis, m massa do veículo, g a constante gravitacional e a inclinação em relação à horizontal.

3.2.1.4 Força de aceleração

A força devido à inércia ocorre devido a alterações de velocidade. Esta é dada pelo produto do peso do veículo com a aceleração. Esta força tanto pode ser negativa como positiva dependendo se o veículo está a aumentar a velocidade se está a reduzir a aceleração, $(\frac{dv}{dt})$.

Assim a força de aceleração traduz-se por: [14] [39]

$$F_a = C_i \times m \times a \quad (4)$$

Esta é a força que o veículo necessita para acelerar e caracteriza-se pelo coeficiente de inércia da caixa de velocidades C_i , a massa do veículo m e a aceleração a .

3.2.1.5 Equação de potência

Agora que as forças que atuam sobre o veículo são conhecidas, estamos preparados para determinar a força de tração necessária, sendo esta dada por: [14]

$$F_{tra} = F_{rr} + F_{aero} + F_{incl} + F_a \quad (5)$$

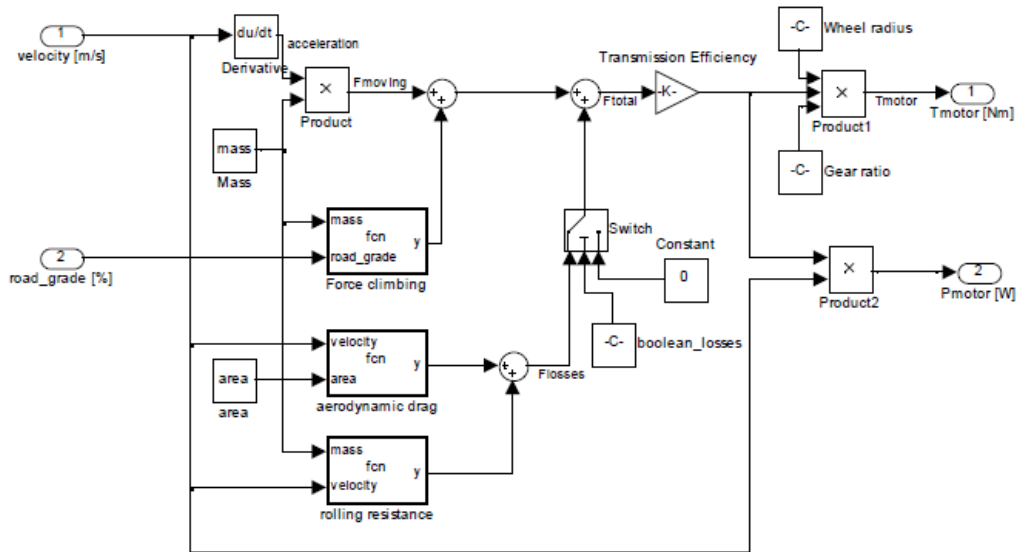


Figura 15: Modelo dinâmico MatLab

O somatório de todas as forças que se opõem ao movimento é caracterizado pela equação dinâmica. Estas são as forças que o sistema mecânico/elétrico tem de vencer para que o veículo se desloque a uma determinada velocidade e consiga acelerar.

$$P_{req} = F_{tra} \times V \quad (6)$$

Em que a potência requerida pelo veículo (P_{req}) é o produto do somatório de todas as forças que se opõem (F_{ra}) ao movimento pela velocidade do veículo (V).

Segundo a tabela 1 e recorrendo à equação (6) verifica-se que tomando por exemplo o arranque do veículo dos 0 ao 10 km/h (2.8 m/s) são necessários 55781,6 kW.

Todos os cálculos seguintes foram obtidos para a situação de acoplamento direto do motor elétrico as rodas. Como conversão se vai manter a caixa redutora e escolhendo o motor elétrico da ANSALDO, portanto conclui-se que este motor é suficiente para as necessidades energéticas do veículo.

Tabela 1: Cálculo dinâmico do veículo

Velocidade (km/h)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120
Velocidade (m/s)	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
Tempo de aceleração (s)	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	4,0	4,0	5,0	5,0	6,0	6,0
Aceleração (m/s ²)	1,4	1,4	1,4	0,9	0,9	0,9	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5
Força resistência ao rolamento	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4	167,4
Força resist. ao rolamento sub 10%	1127,0	1127,0	1127,0	1127,0	1127,0	1127,0	1127,0	1127,0	1127,0	1127,0	1127,0	1127,0
Força resist. Aerodinâmica	2,1	8,4	19,0	33,8	52,8	76,0	103,4	135,1	171,0	211,1	255,4	304,0
Força de aceleração	14087,5	14087,5	14087,5	9391,7	9391,7	9391,7	7043,8	7043,8	5635,0	5635,0	4695,8	4695,8
Total forças de resistência (N)	2420,5	2420,5	2420,5	2420,5	2420,5	2420,5	2420,5	2420,5	2420,5	2420,5	2420,5	2420,5
Força sem a aceleração	25754,5	25754,5	25754,5	16362,9	16362,9	16362,9	16362,9	11667,0	11667,0	11667,0	11667,0	11667,0
Somatório forças atuam sobre veic.	30595,5	30595,5	21203,8	21203,8	21203,8	21203,8	16508	16508	16508	16508	16508	16508
Potência para manter velocidade (W)	7470,6	7470,6	7470,6	7470,6	7470,6	7470,6	7470,6	7470,6	7470,6	7470,6	7470,6	7470,6
Potência para manter velocidade (CV)	10,2	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Energia para acelerar (J)	48311,0	48311,0	48311,0	48311,0	48311,0	48311,0	48311,0	48311,0	48311,0	48311,0	48311,0	48311,0
Potência para acelerar (W)	48311,0	48311,0	48311,0	32207,4	32207,4	32207,4	32207,4	24155,5	24155,5	24155,5	24155,5	24155,5
Potência para acelerar (CV)	65,7	65,7	65,7	43,8	43,8	43,8	43,8	32,9	32,9	32,9	32,9	32,9
Potência Total em W	55781,6	55781,6	55781,6	39677,9	39677,9	39677,9	39677,9	31626,1	31626,1	31626,1	31626,1	31626,1
Potência Total em CV	75,9	75,9	75,9	54,0	54,0	54,0	54,0	43,0	43,0	43,0	43,0	43,0

3.3. Caixa de velocidades

A caixa de velocidades é um elemento mecânico constituído por várias engrenagens acopladas entre si, estas engrenagens são escalonadas de acordo com os pré-requisitos de construção do veículo.

A função deste órgão no veículo é permitir que o mesmo arranque com binário máximo, isto porque no arranque é necessário vencer todas as forças que se opõem ao movimento do veículo.

No caso do nosso projeto decidiu-se manter a caixa de velocidades de origem. Assim, após consulta de diversa bibliografia [47], referente ao *Seat Marbella* obtiveram-se as relações de engrenagens que são apresentadas na tabela seguinte:

Tabela 2: Relações das velocidades *Seat Marbella* [47]

Velocidade	Relação
1 ^a	3.909:1
2 ^a	2.055:1
3 ^a	1.342:1
4 ^a	0.964:1
R	3.615:1

A relação de transmissão do diferencial é de 4.071:1.

Segundo o manual do proprietário, o *Seat Marbella* com motor de combustão interna tem uma potência de 25 kW e 56 N.m. O motor elétrico escolhido para esta conversão é do fabricante ANSALDO. Este motor tem as seguintes características, potência de 15 kW nominal, com a possibilidade de atingir 30 kW máximos, um binário nominal de 50 N.m podendo atingir os 100N.m. [47]

Dos dados obtidos do manual do utilizador do *Seat Marbella* e sabendo que o raio da roda é de 0,260m, calcular-se-á o binário que o motor necessita de produzir para satisfazer as necessidades.

O binário desenvolvido pelo motor define-se por: [46][54]

$$T_M = \frac{T_r}{N_{vel} \times N_{dif} \times E_T} \quad (7)$$

E o binário de resistência ao rolamento[54] :

$$T_r = F_r \times R_r \quad (8)$$

Onde T_M representa o binário no motor, T_r o binário na roda do veículo, R_r representa o raio da roda, N_{vel} indica a relação de transmissão em cada velocidade na caixa de velocidades, N_{dif} representa a relação de transmissão do diferencial (vulgarmente chama-se de relação final) e E_T a eficiência da transmissão.

Das relações de velocidades da caixa calcular-se-á o binário que o motor elétrico necessita de desenvolver para uma velocidade de 50km/h em segunda velocidade[54]

$$T_r = 1347,1 \times 0,26 = 350,3 \text{ N} \quad (9)$$

$$T_M = \frac{350,3}{2,055 \times 4,071 \times 0,85} = 49,29 \text{ N.m} \quad (10)$$

Conclui-se que a opção de manter a caixa de velocidades acoplada é mais vantajosa, além de melhores prestações consegue-se diminuir os custos de conversão. Se não se mantivesse a caixa de velocidades era necessário um motor elétrico mais potente, um pack de baterias mais potente e toda a eletrónica associada a esse aumento de potência.

3.4 Motor elétrico

O motor assíncrono trifásico de rotor em gaiola é caracterizado por ser uma máquina de indução de fácil construção, de elevada robustez, fiabilidade e capacidade para operar nos mais diversos locais, a necessidade de manutenção deste tipo de máquina é baixa bem como o custo associado à manutenção.

Estes tipos de máquinas podem-se dividir em dois conjuntos de máquinas, o já citado rotor em gaiola e o de rotor bobinado.

Na máquina de rotor em gaiola de esquilo a constituição do rotor é feita por barras de material condutor, estando estas barras unidas nas extremidades do rotor. Desta forma o rotor encontra-se em curto-circuito, já na máquina de rotor bobinado tal como o nome indica o rotor desta é bobinado, estas bobinas estão ligadas a anéis coletores, são estes anéis que permitem uma ligação ao exterior, ligação essa feita às resistências. A função destas resistências é permitir ao motor de rotor bobinado um arranque com binário máximo e baixa corrente induzida no rotor pelo estator, esta corrente é baixa no arranque pois é extraída para o exterior através dos anéis coletores e “queimada” nas resistências estatóricas. Na situação de arranque as resistências têm o seu valor máximo, conforme o motor vai aumentando a velocidade, a resistência vai sendo diminuída, quando o motor atinge a velocidade final estabilizada a resistência é “curto-circuitada” fazendo do motor de rotor bobinado uma máquina de indução comum.



Figura 16: Rotor Bobinado

Os enrolamentos do rotor por sua vez estão ligados a três anéis coletores de forma a ser possível ter uma ligação com o exterior.

Os enrolamentos neste tipo de máquina substituem a gaiola de esquilo encontrada nos motores de indução assíncronos comuns.



Figura 17: Estator de um motor de indução

Internamente e externamente o estator das máquinas de rotor bobinado é igual ao da máquina de rotor em gaiola. A sua constituição é feita de enrolamentos integrados em material ferromagnético, formando desta forma a gaiola. O rotor adquire este estado no processo de fundição do mesmo.

3.4.1 Modelo do motor elétrico e controlo de velocidade

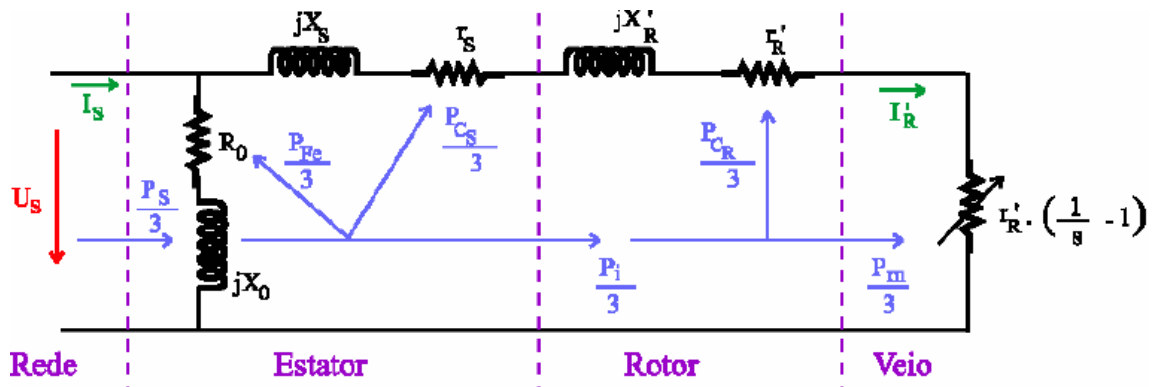


Figura 18: Esquema equivalente aproximado por fase de um motor assíncrono trifásico, que inclui o balanço de potências ativas

A velocidade de funcionamento de uma máquina de indução obedece principalmente a duas variáveis a frequência a que opera e o número pares de polos.

Em que a velocidade dada por uma máquina assíncrona trifásica vem expressa pela seguinte fórmula:

$$n = \frac{60 f}{p} \quad (11)$$

Onde:

n velocidade em rpm

f frequência em Hz

p número de pares de polos da máquina

O número de pares de polos define-se pela construção da máquina, querendo alterar a velocidade normalmente não é possível alterar o número de polos da máquina para a velocidade pretendida. A exceção a esta regra é o motor assíncrono trifásico *Dahlander* que permite, por conveniente ligação dos seus semienrolamentos, obter 2 valores diferentes de p .

Com a evolução da eletrónica de potência no século vinte a variação de velocidade nas máquinas de rotor em gaiola começou a ser equacionada, até aqui a variação de velocidade apenas era conseguida nas máquinas assíncronas de rotor bobinado. Com a evolução da tecnologia atualmente já se consegue que o motor assíncrono trifásico de rotor em gaiola varie a velocidade. Recorrendo à eletrónica de potência a variação é feita consoante as necessidades mecânicas, hoje consegue-se arrancar com o binário maior que zero na máquina assíncrona.

Possivelmente a forma mais popular de controlo de velocidade de uma máquina assíncrona é o conhecido *Volt/Hertz*. Mantendo constante a relação tensão e frequência, consegue-se desta forma manter constante o binário magnético máximo do motor. Esta solução consegue também que o campo girante altere de forma proporcional à velocidade da máquina.

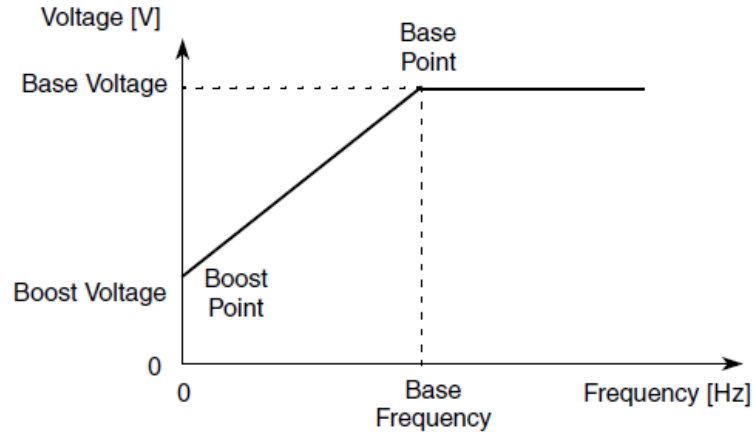


Figura 19: Relação V/F motor assíncrono [55]

Tipicamente a força eletromotriz induzida no rotor por um motor assíncrono de indução é representada por:[20]

$$E_i = 4,44k_{\omega l} \phi_m f_s T_l \quad (12)$$

Em que $k_{\omega l}$ representa um constante característica da máquina, ϕ_m o máximo fluxo, f_s frequência de alimentação e T_l número de espiras nos enrolamentos por fase. Desprezando a impedância do estator podemos dizer que a força eletromotriz é sensivelmente a tensão de alimentação

$$E_i \simeq V_p \quad (13)$$

Assim o fluxo vem descrito como

$$\phi_m \simeq \frac{V_p}{k_b f_s} \quad (14)$$

K_b é constante ($4,44 k_{\omega l} T_l$)

Pelo que a máquina assíncrona trifásica mantém constante e máximo o fluxo magnético quando se varia proporcionalmente a tensão e a frequência de alimentação.

3.5 Inversor trifásico

A tensão trifásica disponível na rede elétrica é obtida através de grupos geradores. A construção destes geradores é feita para que o desfasamento entre fases seja de 120° , no que toca à questão da frequência tal já implica que velocidade que seja praticamente constante ao longo do tempo, dependendo esta do número de polos do gerador vamos ter uma velocidade associada ao grupo gerador. O valor da frequência na rede elétrica europeia tem de ser preciso (50 Hz) pois muitos equipamentos dependem desta precisão para funcionar corretamente, para tal o controlo de velocidade neste tipo de máquina tem de ser milimetricamente preciso.

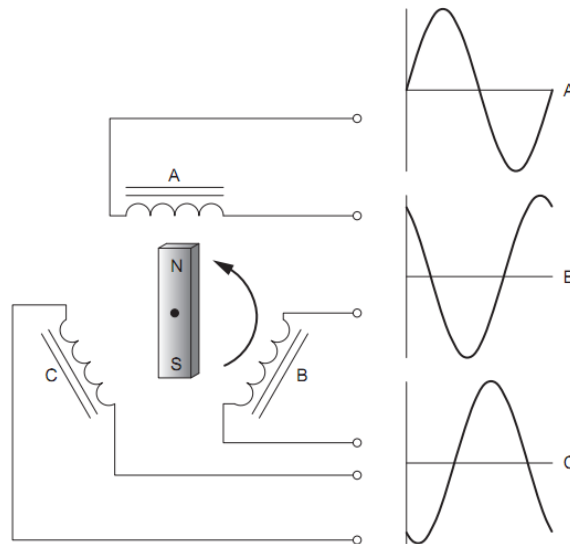


Figura 20: Ondas trifásicas na máquina geradora [22]

Como o motor de propulsão montado no veículo é do tipo indução trifásica é necessário que se obtenha uma fonte de tensão alternada trifásica. É ao inversor eletrónico que cabe a tarefa de converter a tensão contínua obtida a partir das baterias/conversor *boost* em tensão alternada trifásica.

Esta conversão é realizada para alimentar o motor elétrico utilizando essencialmente para o efeito eletrónica de potência e controlo.

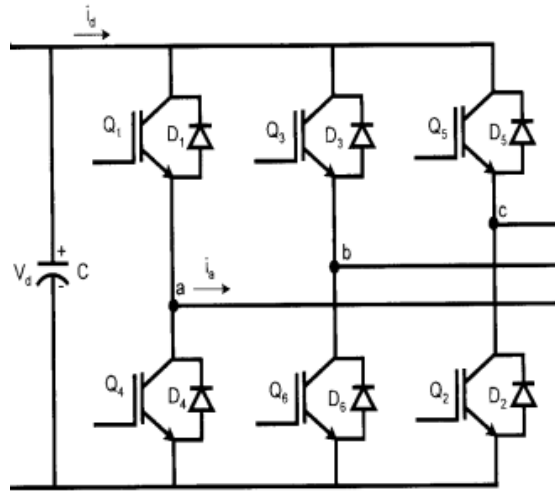


Figura 21: Esquema de potência inversor trifásico

As equações características deste sistema de tensão trifásico são definidas através da série de Fourier seguinte:

$$v_{ab} = v_{a0} - v_{b0} \quad (15)$$

$$= \frac{2\sqrt{3}V_d}{\pi} \left[\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + 0 - \frac{1}{5} \cos 5\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) - \frac{1}{7} \cos 7\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + \dots \right] \quad (16)$$

$$v_{bc} = v_{b0} - v_{c0} \quad (17)$$

$$= \frac{2\sqrt{3}V_d}{\pi} \left[\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + 0 - \frac{1}{5} \cos 5\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - \frac{1}{7} \cos 7\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \dots \right] \quad (18)$$

$$v_{ca} = v_{c0} - v_{a0} \quad (19)$$

$$= \frac{2\sqrt{3}V_d}{\pi} \left[\cos\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right) + 0 - \frac{1}{5} \cos 5\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right) - \frac{1}{7} \cos 7\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right) + \dots \right] \quad (20)$$

3.5.1 Desenvolvimento do conversor trifásico

Os sinais gerados pelo microcontrolador MC3PHAC não são suficientes para a geração das ondas trifásicas. A eletrônica para manipular estes sinais aplica neste projeto consiste em circuitos *optocoupler* e circuitos de ataque à *gate* dos mosfets e finalmente os mosfets.

Com a aplicação dos optocoupler conseguimos criar o isolamento galvânico entre a geração dos sinais e a aplicação destes. O isolamento galvânico tem particularidade de separar fisicamente circuitos elétricos ou circuitos de transmissão de dados, com esta solução evitamos que a corrente que circula no circuito a montante invada o circuito a jusante (Para o efeito foi utilizado o circuito integrado HCPL2211)

O circuito de ataque à *gate* do mosfet é o responsável por ligar e desligar o mosfet, nos inversores trifásicos existe um ponto sensível na montagem, a massa flutuante no andar superior do inversor: para obter este tipo de isolamento temos de recorrer a fontes isoladas de massa flutuantes ou circuitos integrados com essa funcionalidade “*high side gate driver*” Para o efeito foi utilizado o circuito integrado IR2110)

O bootstrap calculado para este inversor vêm que garantir no mínimo; [10]

$$C \geq \frac{[2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f}]}{V_{cc} - V_f - V_{LS} - V_{min}} \quad (21)$$

$$C \geq \frac{[2 \times 100 \times 10^{-9} + \frac{230 \times 10^{-6}}{15.9 \times 10^3} + 5 \times 10^{-9} + \frac{0}{15.9 \times 10^3}]}{15 - 0.7 - 2.1 - 2.1} \quad (22)$$

$$C \geq 21,7 \text{ nF}$$

Em que Q_g represente a carga do mosfet no andar superior do inversor, f a frequência de comutação, Q_{ls} constante de carga do mosfet, I_{qbs} coeficiente de carga da gate do mosfet, I_{cbs} corrente de fuga do condensador de *bootstrap*, V_{cc} Tensão de alimentação, V_f queda de tensão no díodo de *bootstrap*, V_{ls} queda de tensão *lowside* FET e V_{min} a tensão mínima entre V_b (tensão na base do mosfet) e V_s (tensão na source do mosfet).

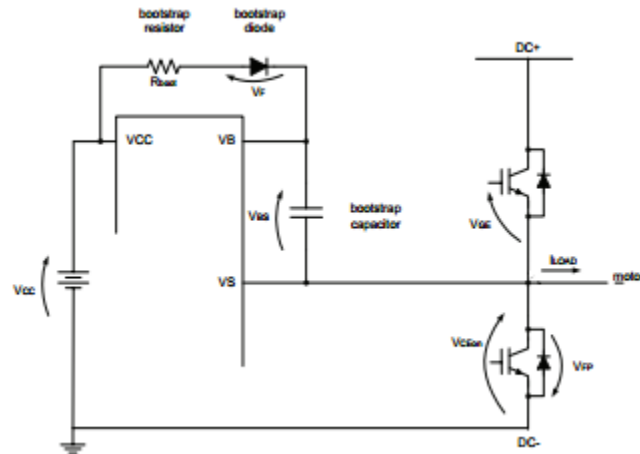


Figura 22: Circuito de bootstrap

O princípio de funcionamento desta técnica consiste em carregar o condensador de *bootstrap* quando o *mosfet* inferior do braço está à condução. Após este entrar ao corte e passado o *deadtime* surge o sinal de comando à gate do *mosfet* superior. Para que o *mosfet* superior entre à condução tem de ser criada uma tensão entre a *gate* e *source*, é nesta altura que a energia armazenada pelo condensador é fornecida à gate do *mosfet* passado pelo circuito IR2110.

3.5.1.1 O MOSFET

Durante a década de 50 do século passado o desenvolvimento da tecnologia semiconductora levou a grandes desenvolvimentos nas áreas relacionadas com a eletrónica de potência. Novas soluções surgem no mercado agora capazes de comutar a frequências mais elevadas e com maior capacidade de potência.

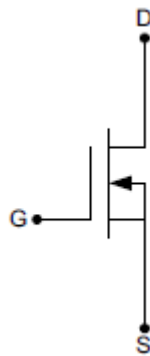


Figura 23: Esquema do mosfet tipo N

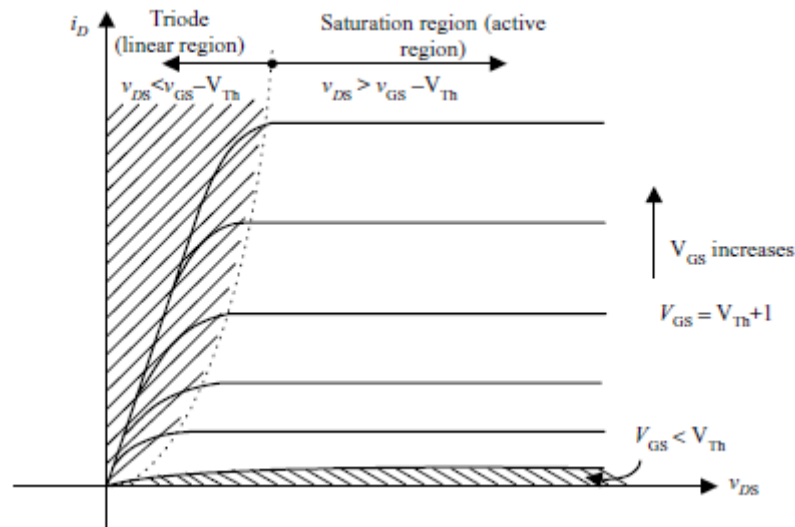


Figura 24: Relação da tensão de gate, corrente de dreno do mosfet

Os circuitos semicondutores representam o ponto-chave da eletrônica de potência nos tempos modernos. Duas características imprescindíveis nestes circuitos são: [19]

Frequência de comutação- número de vezes que liga e desliga (neste projeto foi escolhida 10.6kHz, podendo ir a 21.1kHz)

Potência - capacidade de corte em tensão e capacidade de condução.

Mosfet IRF640

Para o circuito de testes foram utilizados mosfets do fabricante International Rectifier modelo IRF640.

Este mosfet caracteriza-se por ter uma rápida resposta a impulso injetado na gate, capacidade de funcionamento até 175°C, destacando-se o package TO-220 com uma capacidade de dissipação de 50W sem dissipador podendo ir a 150W com dissipador e ventilação forçada segundo fabricante.

Com a capacidade de funcionamento contínuo a 13 Ampère com uma temperatura de 100°C com uma tensão de 200 Volt, em pequenas aplicações torna-se muito interessante este pequeno mosfet. Nos teste iniciais, o barramento DC foi criado com valores em torno dos 120V. Dado que o inversor funciona com níveis de tensão bem acima dos 200 Volt (tensão máxima Dreno Source) este mosfet não se adequa a esta montagem.



Figura 25: Mosfet IRF640

Mosfet BUK438W 800A

Para o circuito final de potência a escolha do mosfet recaiu sobre o BUK438 W 800A com o encapsulamento TO-220AB.

Com uma capacidade de funcionamento até 800 Volt e uma corrente máxima de 7,2 Ampére, este mosfet de potência responde às necessidades do inversor.



Figura 26: Mosfet BUK438W 800A

3.6 Conversor DC/DC Boost

Dentro dos conversores não isolados, o *boost* difere dos restantes destaca-se pelo facto de, a partir de uma tensão de entrada fixa, consegue-se uma tensão de saída superior. Para tal o conjunto dos componentes principais que o constituem (diodo, bobine, transístor e condensador) deste tipo de conversor necessitam de ser dimensionados convenientemente bem como o seu funcionamento tem de ser coordenado entre si.

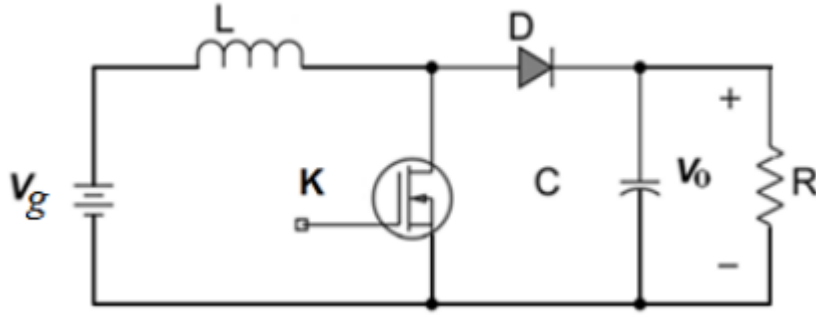


Figura 27: Esquema elétrico conversor *boost*

Neste kit vamos ter disponível uma tensão de 91.7V (plena carga) disponível a partir do pack de bateria. As necessidades no inversor são de 311VDC. Este valor de tensão irá ser fornecido posteriormente ao inversor que por sua vez alimentará o motor elétrico

Como veremos de seguida neste tipo de montagem tanto a corrente média no condensador como a tensão média na bobine tem de ser obrigatoriamente zero [1] [19].

Para o intervalo de tempo 0 a DT_s , e segundo a figura 27

-a lei das malhas terá:

$$V_g - L \frac{di_L}{dt} = 0 \quad (23)$$

-a lei dos nós:

$$\frac{v_0}{R} + C \frac{dv_0}{dt} = 0 \quad (24)$$

Resolvendo em relação à corrente na bobine e a tensão no condensador

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_0}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_g \quad (25)$$

$$V_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Para o intervalo de tempo DT_s . a T_s . e segundo a figura 30

-a lei das malhas terá:

$$V_g - V_0 - L \frac{di_L}{dt} = 0 \quad (27)$$

-a lei dos nós:

$$i_L - \frac{v_0}{R} - C \frac{dv_0}{dt} = 0 \quad (28)$$

Resolvendo em relação à corrente na bobine e a tensão no condensador

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_0}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_g \quad (29)$$

$$V_0 = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} i_L \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

A relação de conversão de corrente para o conversor *boost* é dada por: [1] [19].

$$\bar{I}_c = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_c(t) dt = 0 \quad (31)$$

Implica que:

$$DT_s \left(-\frac{V_0}{R} \right) + (1-D)T_s \left(-\bar{I}_L - \frac{V_0}{R} \right) = 0 \quad (32)$$

$$\bar{I}_L = \frac{V_0}{(1-D)R} \rightarrow \bar{I}_L = \frac{I_0}{1-D} \rightarrow 1-D = \frac{I_0}{\bar{I}_L} \quad (33)$$

Em que I_c representa a corrente no condensador, T_s a frequência de comutação do conversor R a carga do conversor e D o fator de ciclo [1] [19]

Para a tensão a relação de conversão do conversor *boost* é:[1] [19]

$$\bar{V}_L = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_l(t) dt = 0 \quad (34)$$

$$\bar{V}_L = \frac{1}{T_s} [\int_0^{DT_s} v_g(t) dt + \int_{DT_s}^{T_s} (V_g - V_0) dt] = 0 \quad (35)$$

$$\frac{1}{T_s} V_g DT_s + \frac{1}{T_s} (V_g - V_0)(T_s - DT_s) = 0 \quad (36)$$

V_g define a tensão de entrada para o conversor *boost*, V_0 , a tensão de saída do conversor T_s a frequência de comutação e D o fator de ciclo [1] [19]

Vindo que:

$$V_g = V_0 - V_0 D \quad (37)$$

$$\frac{V_0}{V_g} = \frac{1}{1-D} \quad (38)$$

Chega-se assim à relação de conversão do conversor *boost*.

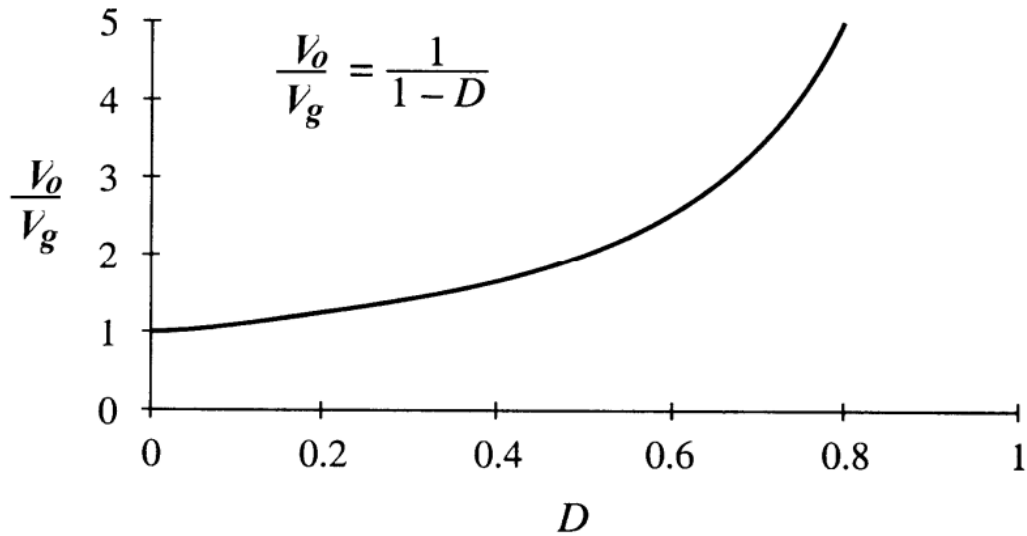


Figura 28: Gráfico da tensão de saída em relação à tensão de entrada do conversor

Em condições ideais com um fator de ciclo (D) igual a 1 a tensão de saída seria infinito, na realidade os componentes apresentam limitações logo essa situação não é de todo possível. [1][19]

3.6.1 Tipos de funcionamento

O funcionamento deste conversor baseia-se em comutar repetidamente o transístor, neste projeto a comutação situa-se nos 40kHz. Dependendo do tempo em que o transístor está a *ON* e a *OFF* definindo assim o tipo de funcionamento do conversor *boost*, este funcionamento pode ser de duas formas, funcionamento contínuo ou funcionamento descontínuo, para o funcionamento contínuo tanto a corrente na bobine como a tensão condensador (tensão de saída) não atingem a zona de descarga ($I_L=0$ ou $U_0=0$). [1][42]

Neste projeto pretende-se que nem o condensador nem a bobine atinjam a zona de descarga, portanto todo o dimensionamento foi calculado para o funcionamento contínuo.

3.6.1.1 Funcionamento contínuo

No instante em que o transístor se encontra à condução a corrente fornecida pela fonte flui única e exclusivamente pela bobine e mosfet, enquanto isto na saída a carga é alimentada pela energia armazenada no condensador.

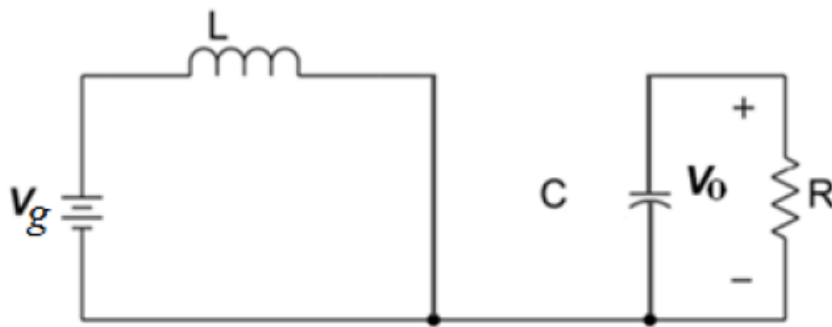


Figura 29: Conversor *boost* transístor a *ON*

Para o intervalo de tempo enquanto o transístor está *On* teremos o fator de ciclo seguinte. [1][19]

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad (39)$$

Enquanto isto, a tensão na bobine vem dada da seguinte forma:[1][19]

$$0 < t < DT_s \rightarrow V_L(t) = V_g \quad (40)$$

Por sua vez a corrente na bobine vem definida segundo: [1] [19].

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_g}{L} \quad (41)$$

Esta vai aumentar durante o intervalo de fator de ciclo D

A corrente no condensador vem definida segundo: [1][19]

$$i_c(t) = - \frac{V_0}{R} \quad (42)$$

No instante em que o transístor entra ao corte teremos então a situação de *boost*, (descarga da energia absorvida pela bobine no intervalo de tempo D), neste instante também é carregado o condensador para o próximo ciclo de transístor a *ON*.



Figura 30: Conversor boost transístor a *OFF*

Para o intervalo de tempo quando o transístor está *Off* teremos o fator de ciclo seguinte [1] [19].

$$1 - D = \frac{t_{off}}{T_s} \quad (43)$$

A tensão na bobine vem da seguinte forma: [1] [19].

$$DT_s < t < T_s \rightarrow V_L(t) = V_g - V_0 \quad (44)$$

Consequentemente esta diminui durante o intervalo de fator de ciclo 1- D [1] [19].

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_g - V_0}{L} \quad (45)$$

A corrente no condensador vem definida segundo [1] [19].

$$i_c(t) = i_L - \frac{V_0}{R} \quad (46)$$

3.6.2 Dimensionamento do conversor *boost*

Neste projeto o conjunto de baterias instaladas perfaz uma tensão de 91,7 volt, dadas as necessidades no inversor para obter o valor de 230 volt entre fases teremos de elevar o valor da tensão contínua. O valor de 230 volt é um valor eficaz, assim a tensão terá de ser elevada de 84 volt dc para os 325 Volt DC:

$$V_{RMS_{AC}} = \sqrt{2} \times V_{DC} \quad (47)$$

Especificações para o dimensionamento do conversor boost:

Tensão de entrada máxima: ($V_{g \max}$) 91,7 Volt

Tensão de entrada mínima: ($V_{g \min}$) 80 Volt

Tensão de saída (V_{out}): 325 Volt

Frequência de comutação: 40 kHz

Corrente de saída (I_{out}) : 10 Ampére

Fator de ciclo máximo para o conversor *boost* [1] [19].

$$\frac{V_0}{V_{g \min}} = \frac{1}{1-D} \quad (48)$$

$$\frac{325}{80} = \frac{1}{1-D} \Leftrightarrow 4,06 = \frac{1}{1-D} \Leftrightarrow 1-D = \frac{1}{4,06} \Leftrightarrow D \simeq 0,75 \quad (49)$$

Fator de ciclo mínimo para o conversor *boost* [1] [19].

$$\frac{V_0}{V_{g \max}} = \frac{1}{1-D} \quad (50)$$

$$\frac{325}{91,7} = \frac{1}{1-D} \Leftrightarrow 3,54 = \frac{1}{1-D} \Leftrightarrow 1-D = \frac{1}{3,54} \Leftrightarrow D \simeq 0,72 \quad (51)$$

3.6.2.1 Dimensionamento da bobine e díodo

Para o dimensionamento da bobine necessária para o conversor recorreremos á seguinte fórmula [1] [19].

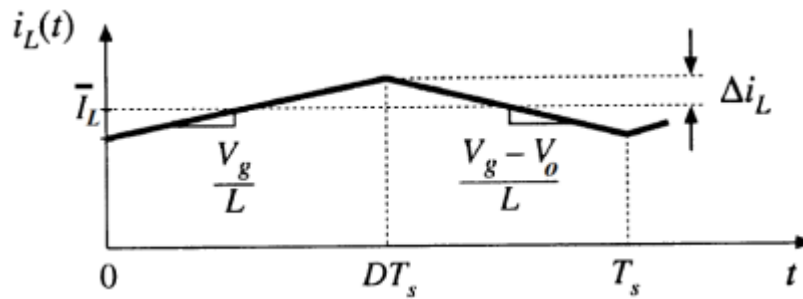


Figura 31: *Ripple* da corrente na bobine do conversor *boost*

$$\Delta I_{L_{pp}} < 0,02 \times I_{out} = 0,02 \times 10 = 0,2 \text{ A} \quad (52)$$

Vamos estabelecer que o *ripple* da corrente na bobine é 2%

$$L = \frac{V_{g \max}}{\Delta I_{L_{pp}}} \times D_{\min} \times T_s \quad (53)$$

Considerando o período de $25\mu s$ que corresponde a uma frequência de comutação de $40kHz$, um *ripple* de corrente na bobine de 2%, o fator de ciclo de 0,71 e uma tensão de entrada máxima de 91,7V calcularemos então o valor da bobine para este conversor.[1][19]

$$L = \frac{91,7}{0,2} \times 0,72 \times 25 \times 10^{-6} \quad (54)$$

Em que L vira:

$$L \simeq 8,25 mH \quad (55)$$

No que ao diodo diz respeito, temos que a potência na entrada é igual à potência na saída considerando que o inversor é ideal [19], assim o $P_{in} = P_{out}$, determina-se então a corrente que atravessa o diodo. [1][19]

$$P_{in} = P_{out} \Leftrightarrow 91,7 \times I_{in} = 325 \times 10 \Leftrightarrow I_{in} = 35,5A \quad (56)$$

$$I_{diode} = I_0 = (1 - D)I_{in} \quad (57)$$

$$(58)$$

$$I_{diode} = I_0 = (1 - D_{min})I_{in} \quad (59)$$

$$I_{diode} = I_0 = (1 - D_{max})I_{in} \quad (60)$$

$$I_{diode} = I_0 = (1 - 0,72)35,5 \Leftrightarrow I_o = 9,94 \quad (61)$$

$$I_{diode} = I_0 = (1 - 0,75)35,5 \Leftrightarrow I_o = 8,86 \quad (62)$$

Considera-se para este cálculo o intervalo de tempo quando o diodo está à condução (1-D). Das equações (58) e (59) verifica-se que a corrente

3.6.2.2 Dimensionamento do condensador

Para o dimensionamento do condensador de saída do conversor recorreremos á seguinte fórmula

$$C = \frac{V_o}{\Delta V_{opp} R_o} \times D_{min} \times T_s \quad (63)$$

Considerando novamente o período de $25\mu s$ que corresponde a uma frequência de comutação de $40kHz$, um *ripple* de tensão no condensador de 5%, o fator de ciclo de 0,72 e uma tensão de saída de 325V e a carga de $32,5\Omega$ calcularemos então o valor do condensador para este conversor. [1][19][20]

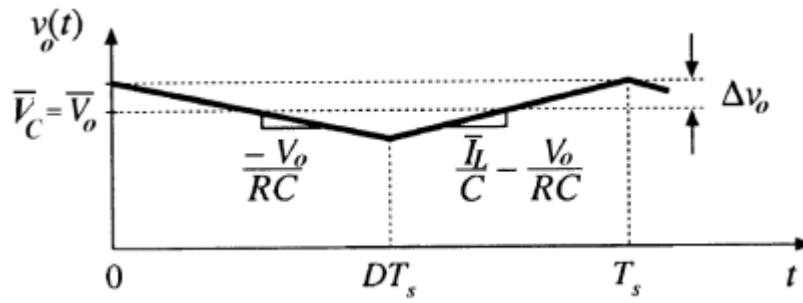


Figura 32: *Ripple* da tensão de saída do conversor *boost*

$$\Delta V_{opp} < 0,05 \times V_o = 0,05 \times 325 = 16,25 \text{ V} \quad (64)$$

$$C = \frac{325}{16,25 \times 32,5} \times 0,72 \times 25 \times 10^{-6} \quad (65)$$

Em que C virá:

$$C = 11,08 \mu F \quad (66)$$

3.7 A fonte de alimentação

O combustível dos veículos elétricos tal como o nome indica é a energia elétrica, tal como nos veículos de combustão interna que tem um depósito de combustível, nos veículos elétricos a energia elétrica tem de ser armazenada, independentemente do tipo de veículo ou tecnologia de o armazenamento da energia elétrica difere. As tecnologias existentes vão desde a mais comum bateria elétrica à pilha de combustível.

O princípio da bateria é muito simples, entre dois materiais diferentes (elétrodos) imersos numa solução de eletrólito, produz-se uma diferença de potencial elétrico, este potencial elétrico é que nos interessa para os veículos elétricos. Com o avanço da tecnologia atual novas soluções do composto eletrolítico tem vindo a ser desenvolvidas. Para os veículos elétricos os pontos fortes de uma bateria têm de ser o ciclo de vida, densidade de energia e de potência e a eficiência energética.

Entende-se por ciclo de vida o número de cargas e descargas que a bateria suporta até que perde a capacidade de reter carga, no que toca ao ciclo de vida da bateria este caracteriza-se por depender da profundidade de descarga da bateria. A eficiência da bateria resulta do facto de, aquando da sua carga e descarga não ser utilizada toda a energia que está armazenada. Densidade de energia expressa-se em Wh/kg, já a densidade de potência (W/kg) diz-nos a potência elétrica que determina bateria consegue fornecer para as os objetivos que foram desejados para o projeto. Estas duas características estão relacionadas diretamente com a autonomia do veículo e performance. Para os veículos elétricos (VE) os pontos fortes de uma bateria têm de ser o ciclo de vida, densidade de energia e de potência e a eficiência energética

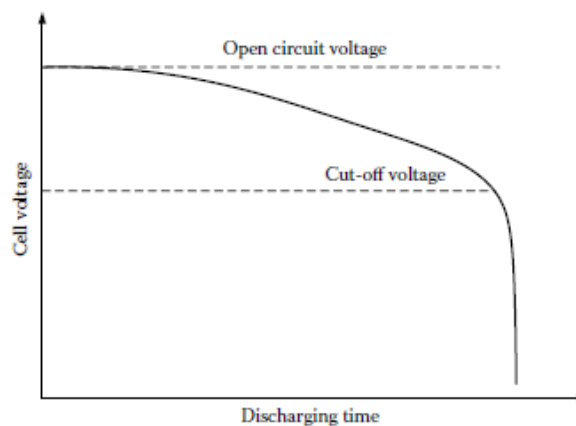


Figura 33: Curva típica da descarga da bateria [46]

A escolha de baterias para este projeto recaiu sobre o fabricante OPTIMA o modelo D34/78. As características desta bateria são à plena carga 13,1 Volt com uma corrente de 55A.h. a temperatura de 20°C.[44][45]

A disposição do pack de baterias vai ficar em formato misto (ligações em série e paralelo). Ao todo estará instalado catorze baterias, de modo a obter os 91,7 Volt DC para o conversor *boost*, vão ser ligados em série sete baterias, estas sete, estarão em paralelo com as outras sete baterias.[34][35]

Com esta associação o pack de baterias dispõe de 10,0 kW.h.

3.8 Microcontrolador PIC18f458

O microcontrolador é um dispositivo eletrônico composto de entradas e saídas, conversores analógicos/digital, capacidade de processamento de cálculo, memória interna, e capacidade de comunicação com interfaces variadas. Atualmente no mercado existem vários tipo de microcontroladores de vários fabricantes e específicos para os mais variados processos que necessitam de um circuito integrado desta natureza.

No caso da *Microchip*, fabricante escolhido para este projeto, os microcontroladores dividem-se por famílias, estas famílias de microcontroladores são de 8, 16 e 32 bits.



Figura 34: Microcontrolador PIC18F458

Para este projeto a escolha foi para o microcontrolador PIC18F458 dado o conhecimento que foi adquirido ao longo da licenciatura. Este microcontrolador segue a filosofia da arquitetura de *harvard* (memória de dados separada da memória de programa).

A gestão de comandos externos pedidos pelo utilizador (liga inversor, movimento frente trás) a visualização do estado do inversor(velocidade do motor, sentido de direção selecionado) e por fim a comunicação UART com o microcontrolador MC3PHAC, vai estar a cargo do microcontrolador PIC18F458.

Este microcontrolador foi ligado um relógio externo de 8 MHz, conseguindo assim $500ns$ para cada ciclo de instrução.

$$C_i = 4 \times \frac{1}{f_{osc}} \quad (67)$$

$$C_i = 4 \times \frac{1}{8 \times 10^6} \quad (68)$$

$$C_i = 500ns \quad (69)$$

Em que C_i representa o ciclo de instrução e F_{osc} a frequência do cristal.

Algumas das características deste microcontrolador:

- Memória EEPROM de 256 Bytes
- Módulo de PWM
- Memória Flash 32kB
- Conversor ADC
- Comparador
- Módulo de comunicação USART

Para controlar todos os sistemas instalados num veículo elétrico tem de haver algo a controlá-los, neste projeto essa função coube ao pic18f458.

Este tipo de microcontrolador depois de devidamente programado executa comandos consoante as ordens que recebe do exterior.

Neste projeto do veículo elétrico o microcontrolador através do módulo analógico lê o valor que está na entrada analógica, processa essa informação para posteriormente a enviar ao microcontrolador do inversor, desta forma define-se a velocidade que o utilizador pretende atingir com o seu veículo elétrico.

Outra funcionalidade atribuída ao microcontrolador é a direção que o utilizador pretende tomar (seguir em frente ou recuar). O utilizador através de um seletor no habitáculo escolhe esta funcionalidade.

Um pequeno painel LCD indica ao utilizador qual o estado de todo o sistema a direção que o veículo tem pré-selecionada a velocidade a que o motor elétrico está a funcionar, ajudando assim o utilizador a perceber o que se passa ao seu redor.

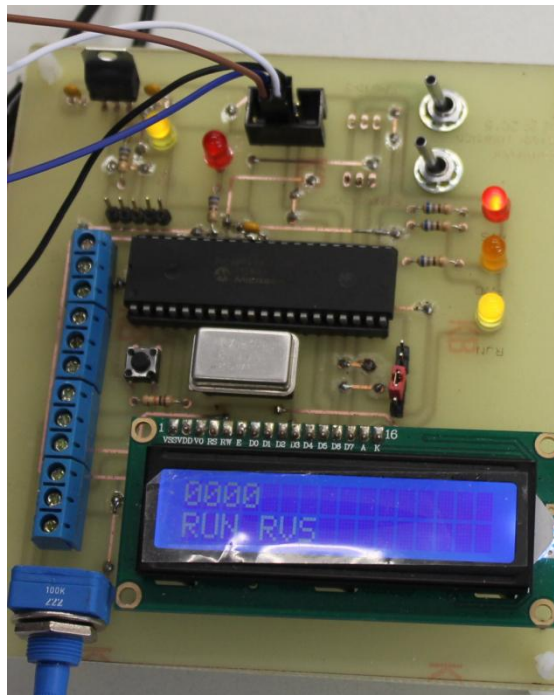


Figura 35: Placa de controlo e LCD

Além das funcionalidades descritas em cima, o *PIC18F458* tem uma funcionalidade muito importante, a interrupção, neste microcontrolador existem dois tipos de interrupção, de alta prioridade e de baixa prioridade. Tal como o nome indica quando ocorre um pedido de interrupção, o microcontrolador mantém os estados do programa principal, enquanto isto processa a interrupção. Se ocorrerem as duas interrupções em simultâneo, o *PIC* executa a de alta prioridade primeiro, depois a de baixa prioridade para depois voltar ao processo.

Seguidamente é demonstrado um excerto do código utilizado neste projeto para demonstrar como se processa uma interrupção.

Começando por definir as prioridades:

```
RCON.IPEN = 0; //Habilita a prioridade nas interrupções
```

No nosso caso a interrupção ocorre em intervalos de tempo definidos por nós, neste caso de 100ms em 100 ms

```
T0CON = 0x81;
```

```
TMR0H = 0x3C; //"carrega" o valor no timer0 para interrupção //TMR0 Preload = 64735; Actual Interrupt Time : 100ms
```

```
TMR0L = 0xAF; //"carrega" o valor no timer0 para interrupção //TMR0 Preload = 64735; Actual Interrupt Time : 100ms
```

Após terminado o tempo entre interrupções, esta é invocada:

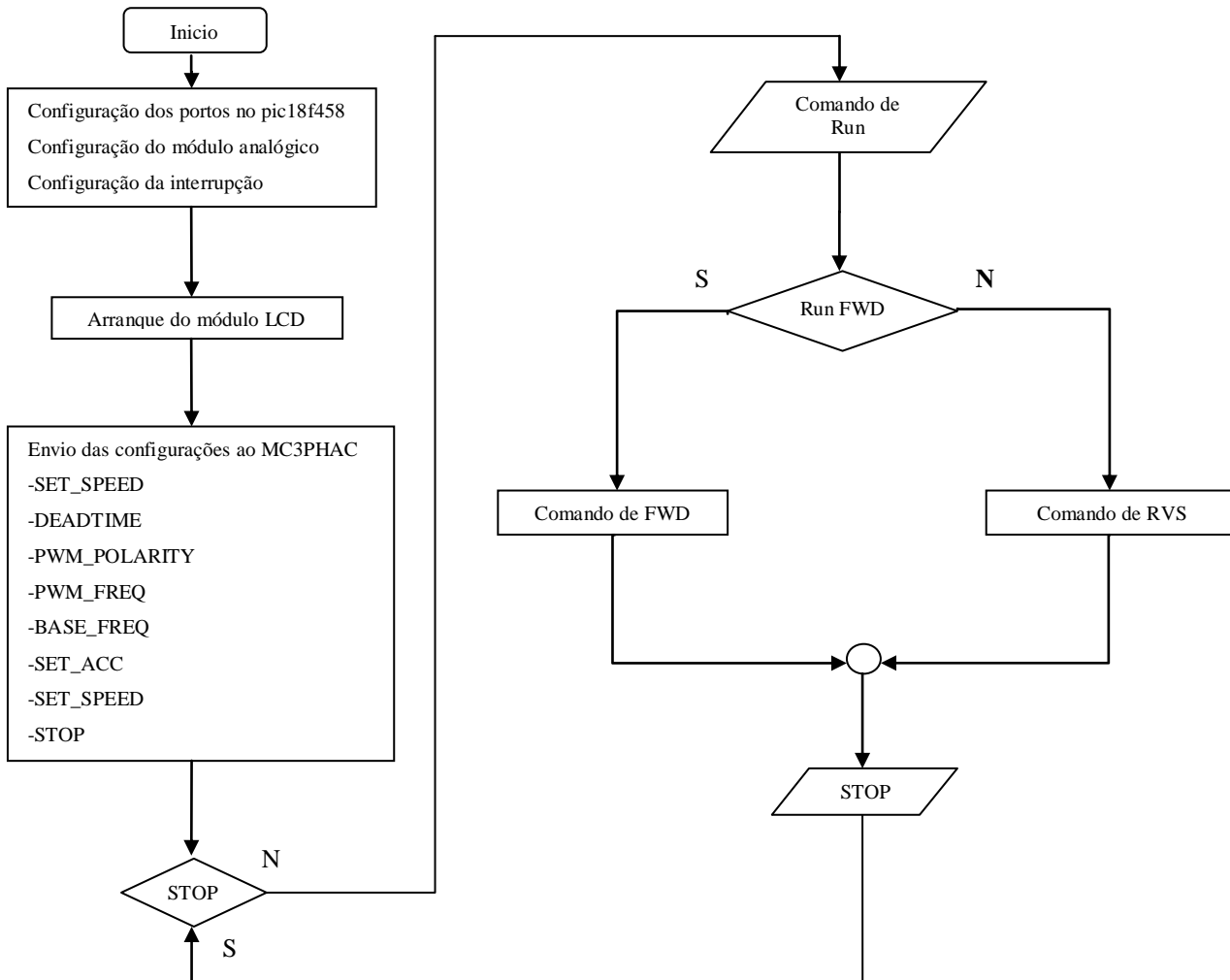
```
void interrupt() {
  if (TMR0IF_bit=1)
  {
    TMR0IF_bit = 0;          // clear TMR0IF

    TMR0H = 0x3C;
    TMR0L = 0xAF; //interrupção de 100ms em 100ms
  }
}
```

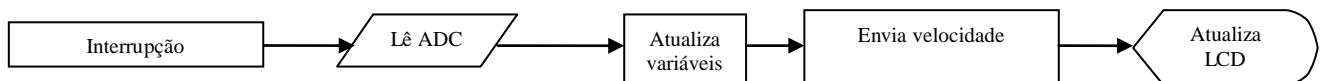
É executado o conteúdo da interrupção. Nesta altura o código base continua a ser executado. Apenas quando as instruções dentro da interrupção são executadas, neste instante o estado das variáveis é atualizado até que nova ordem de interrupção surja.

Na página seguinte é apresentado um fluxograma explicativo acerca do processo de colocação em funcionamento do inversor de potência.

Fluxograma do programa principal



Fluxograma interrupção



3.9 Microcontrolador MC3PHAC



Figura 36: Microcontrolador MC3PHAC

O objetivo deste projeto consiste em utilizar um motor elétrico trifásico de indução. Assim, este microcontrolador possui a capacidade de criar os sinais necessários para colocar um inversor trifásico em funcionamento

Desenvolvido especificamente para inversores trifásicos este pequeno microcontrolador destaca-se pela sua versatilidade, robustez e baixo custo. Associado a estas características o MC3PHAC tem a vantagem de funcionar em modo de *standalone* ou em modo *host*, capacidade de parametrização consoante as necessidades da aplicação.

No arranque do microcontrolador, este faz um varrimento ao pino 20 (VBOOST_MODE), caso o estado deste pino se situar no nível lógico alto, o microcontrolador funciona em estado *standalone*. Nesta configuração todos os comandos de *run*, *stop* e velocidade são interpretados diretamente pelo próprio. No caso do nível lógico baixo o microcontrolador vai entrar em funcionamento *host*. Nesta situação os comandos de *run*, *stop*, referência de velocidade e também estado de funcionamento são acessível via comunicação UART, também neste estado o MC3PHAC só funciona após definidos

3.9.1 Algumas funcionalidades do MC3PHAC

-geração da tensão trifásica

Uma tensão trifásica pode ser gerada de diversas formas. No nosso caso obtemos as ondas sinusoidais através de modulação PWM, conseguindo desta forma manter a relação V/f (3.4.1) constantes em todo o regime de funcionamento da máquina assíncrona.

-Controlo de velocidade Volts/Hertz

Capacidade do controlo de velocidade de um motor trifásico na gama de frequência de 1 a 128Hz, através de um sinal analógico ou diretamente através do comando de set point de velocidade.

- 6 saídas de sinais de PWM

6 saídas de sinais para as fases U, V, W. estes sinais são posteriormente trabalhados e aplicados as gates dos transístores mosfets da placa de potência.

-Possibilidade da escolha de polaridade de PWM

Consoante o tipo de transístores mosfet utilizados assim vamos parametrizar o microcontrolador. Temos a possibilidade de parametrizar o microcontrolador para mosfet do tipo P e mosfets do tipo N. Em modo de *host* conseguimos definir a polaridade do andar superior e do andar inferior separadamente, conseguindo assim ter mosfets do tipo P e do tipo N a funcionar no inversor.

-Capacidade de funcionamento a 50/60Hz

Dependendo do motor assíncrono podemos parametrizar o inversor para funcionar a 50 ou 60Hz.

-Frequência de PWM selecionável

No funcionamento *standalone* temos a possibilidade de funcionamento de 4 frequências diferentes sendo definidas pelo valor de tensão aplicado ao pin MUX_IN.

Também no funcionamento em modo de *host* temos 4 possibilidades de escolha da frequência de PWM, uma vez definida a mais apropriada à eletrônica é posteriormente enviada via comunicação

-Comunicação série

.

Na nossa aplicação como o microcontrolador é utilizado em modo *host* os comandos são enviados a este via comunicação série. A comunicação faz-se com um baud rate de 9600 bps entre o microcontrolador PIC18F458 e o microcontrolador MC3PHAC.

-Detecção de tensão no barramento DC

Com a monitorização continua da tensão do barramento DC para proteção do inversor. Caso esta tensão assuma valores abaixo ou acima dos especificados o microcontrolador pode entrar em falha ou acionar a resistência de frenagem.

-Detecção de falha

Na possibilidade de uma falha externa ocorrer, o controlador desliga de imediato os sinais de PMW aplicado ao inversor.

-Saída indicação de falha

Na sequência de qualquer falha gerada pelo controlador esta é indicada pelo led respetivo.

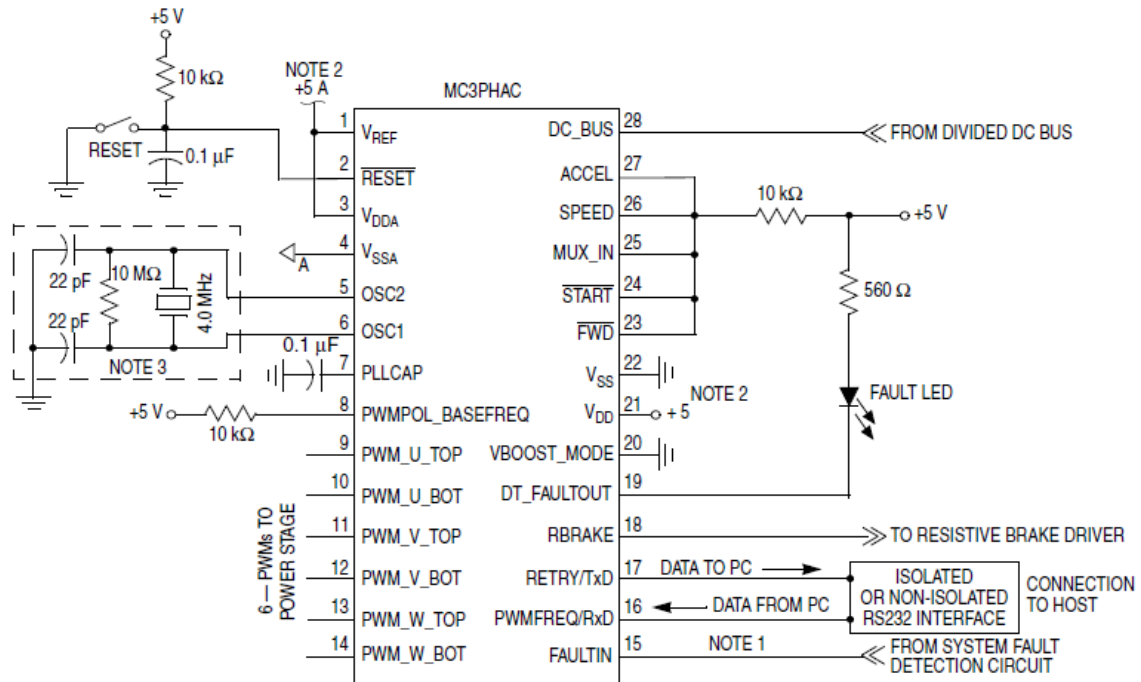


Figura 37: Esquema de ligação do MC3PHAC

3.9.2 Comandos MC3PHAC

Para o desenvolvimento de inversor o MC3PHAC está em funcionamento de modo *host*, assim todas as ordens são recebidas e enviadas através da comunicação UART. Para que a comunicação UART entre o PIC18F458 e o MC3PHAC funcione corretamente esta tem de obedecer a determinadas regras, caso contrário o microcontrolador MC3PHAC não interpreta os comandos recebidos. [4]

start-of-message (1 BYTE)	command (1 BYTE)	data part (known length)	checksum (1 BYTE)
------------------------------	---------------------	-----------------------------	----------------------

Figura 38: Comandos enviados para parametrização do MC3PHAC via UART

Dado que a estratégia adotar neste projeto foi comunicar com o microcontrolador via comunicação UART, esta tarefa foi extremamente complicada.

A informação acerca deste assunto é muito diminuta, paralelamente todos os projetos já feitos com este circuito integrado abordaram sempre a técnica de *standalone*. Foi contactado o fabricante do circuito integrado mas a resposta deste era sempre para utilizar o programa desenvolvido por eles, esta opção foi colocada de parte por o objetivo foi o de

comunicar com o MC3PHAC utilizando o microcontrolador PIC18F458, explorando desta forma o protocolo UART e utilizando-o entre a comunicação dos dois microcontroladores.

Inicialmente a fim de testar a comunicação com o microcontrolador e perceber mais detalhadamente o formato de comandos aceites utilizou-se a interface PIC-KIT 2 na funcionalidade de comunicação UART. No anexo 8.1 é explicado o envio dos comandos feitos através do PIC-KIT 2. A imagem seguinte mostra a comunicação estabelecida com o PIC KIT 2, utilizando a funcionalidade *UART tool*.

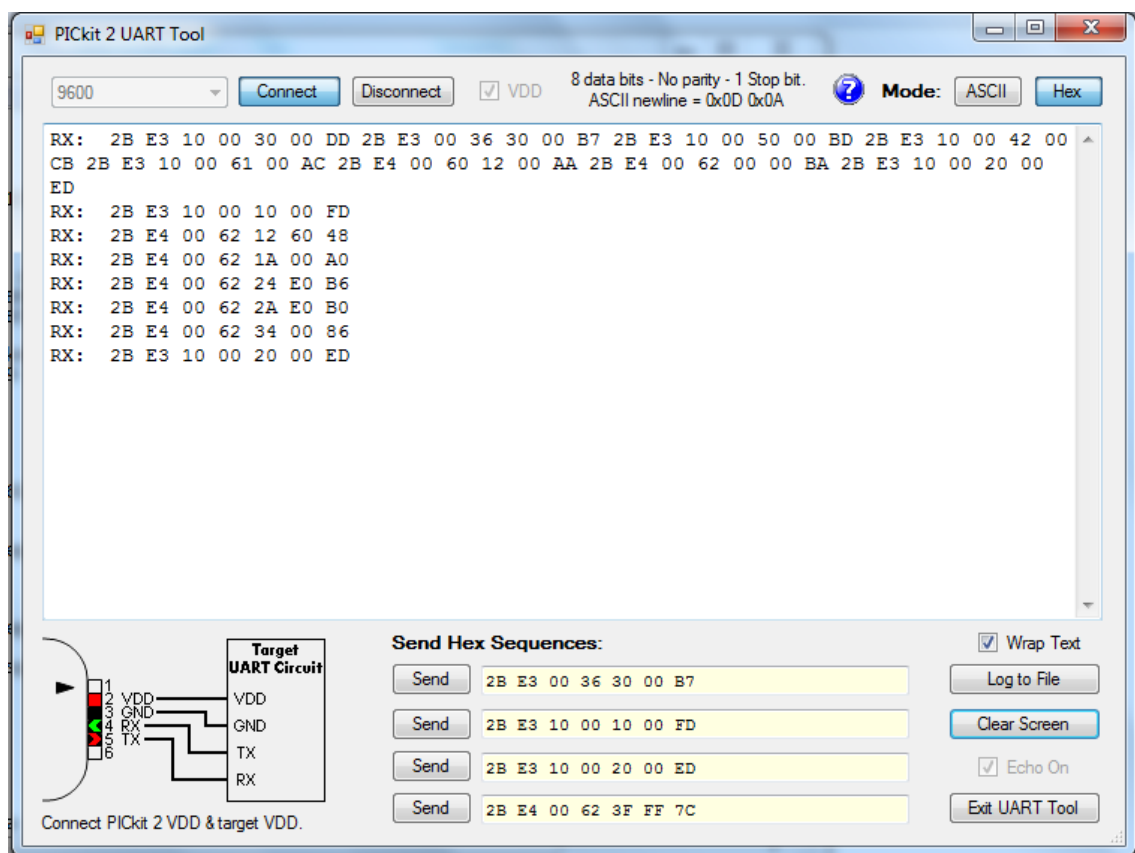


Figura 39: Comunicação com o MC3PHAC via PICKIT

Como referido anteriormente a informação disponível acerca do funcionamento do MC3PHAC em modo *host* é diminuta, as primeiras abordagens na tentativa de comunicação foram feitas recorrendo a ferramenta PICKIT 2 funcionalidade UART.

Paralelamente a estas tentativas foi contactado o fabricante do MC3PHAC a fim de facultar alguma informação de como se processa o envio dos comandos via UART. Esta tentativa foi inglória pois o fabricante nem sequer respondeu aos pedidos realizados.

Após perceber o funcionamento da comunicação esta passou a ser feita exclusivamente através do microcontrolador PIC18F458.

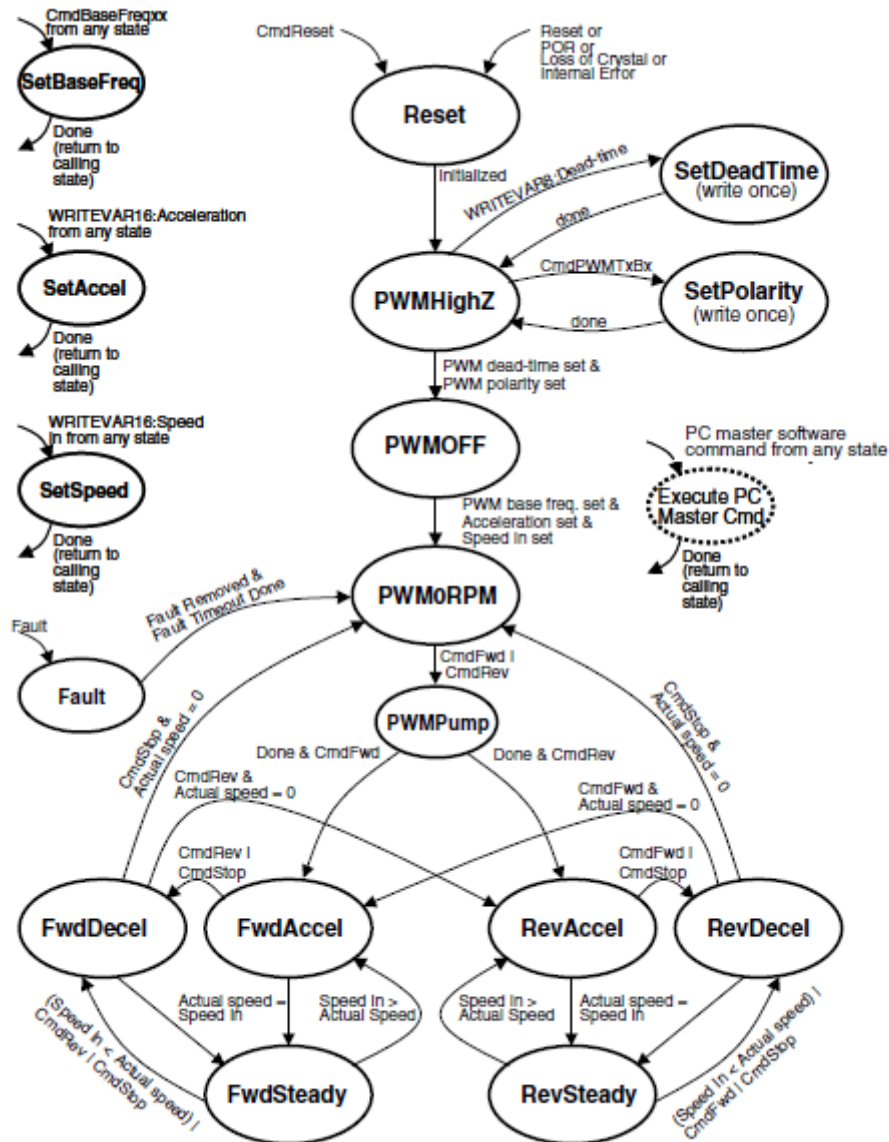


Figura 40: Fluxograma de funcionamento do MC3PHAC[3]

-PWM dead time- define o tempo em que ambos os sinais nas gates dos transístores mosfet estão a nível logico baixo. Esta particularidade é de extrema importância, evita que no mesmo braço do inversor ambos os mosfet permaneçam ligados. Evitando assim o curto-circuito no barramento DC.

-PWM *polarity*- consoante os mosfets/IGBT's a utilizar (do tipo NPN ou do tipo PNP) podemos definir no microcontrolador se estes comutam a nível lógico baixo ou alto.

-PWM *frequency*- frequência a qual o nosso inversor vai gerar os sinais de PWM a aplicar nas gate dos mofet.

-Base *frequency*- define a frequência base da máquina que vamos acoplar 50Hz ou 60Hz.

Acceleration- configuração do tempo de resposta às variações de velocidade.

Definidos os parâmetros de funcionamento (apresentados anteriormente) o microcontrolador necessita apenas de um comando de *start* e referência para entrar em funcionamento

Tomando por exemplo o comando de *RESET* vamos então decifrar este comando.

Frame de envio do comando de *RESET* que o PIC18F458 envia através do protocolo UART para o MC3PHAC:

2B E3 10 00 30 00 DD

2B- início de mensagem a ser enviada em ASCII “+”

E3-o comando tem o tamanho de 1 *byte*

10 00 -endereço de memória para onde o comando é enviado

30 00 -envio do comando de *RESET*

DD -*check sum*

Após o envio deste comando, se o mesmo for bem-sucedido no envio o MC3PHAC envia um resposta a confirmar que o mesmo foi bem recebido. Essa resposta é apresentada seguidamente.

2B 00 00

2B - início de mensagem a ser enviada em ASCII “+”

00 – operação executada com sucesso

00 – *check sum*

Na leitura de estado de funcionamento do MC3PHAC, os comandos a enviar obedecem a regras tal como o envio da configuração. As respostas do MC3PHAC são formatadas segundo a seguinte tabela:[3]

start-of-block (1 BYTE)	status code (1 BYTE)	data part (known length)	checksum (1 BYTE)
----------------------------	-------------------------	-----------------------------	----------------------

Figura 41: Definição comandos enviado para leitura de dados via UART no MC3PHAC

Tomado por referência a tabela acima vamos ler o valor de tensão DC, o comando para ler a tensão do barramento DC virá da seguinte forma:

2B D1 00 79 B6

2B - início de mensagem a ser enviada em ASCII “+”

D1- ler uma variável do tipo WORD

00 79 – queremos ler o valor do barramento DC

B6- *check sum*

O MC3PHAC responderá com o valor analógico lido no pino 28, a amplitude máxima de leitura analógica deste pino é de 5V.

Se o objetivo do utilizador for saber qual o estado de funcionamento do MC3PHAC então o comando é o seguinte:

2B D0 00 AE 82

2B - início de mensagem a ser enviada em ASCII “+”

D0 – ler uma variável do tipo byte

00 AE – indica quais os bits de *setup* foram configurados

82 – *check sum*

Confirmação que os valores foram inseridos corretamente

Tabela 3: Resposta do MC3PHAC a operações efetuadas com sucesso

Status Code	Value	Description
MCB_STS_OK	0x00	The operation finished successfully, return data is valid (if any)
MCB_STS_RECRUN	0x01	Data recorder is running (see data recorder description)
MCB_STS_RECDONE	0x02	Data recorder is stopped (see data recorder description)

Quando os comandos são enviados de forma errada ou na ocorrência de perturbações na comunicação UART, o MC3PHAC devolve uma mensagem de erro, esta mensagem informa que tipo de falha ocorreu. A tabela seguinte mostra quais os erros enviados pelo MC3PHAC.

Tabela 4: Resposta a falhas enviadas pelo MC3PHAC

Status Code	Value	Description
MCB_STC_INVCMD	0x81	Unknown command code (unsupported operation).
MCB_STC_CMDCSERR	0x82	Command checksum error
MCB_STC_CMDTOOLONG	0x83	Command too long, the receive buffer too small to accept it
MCB_STC_RSPBUFFOVF	0x84	Response would not fit into the transmit buffer
MCB_STC_INVBUFF	0x85	Invalid buffer length or operation
MCB_STC_INVSIZE	0x86	Invalid size specified
MCB_STC_SERVBUSY	0x87	Service is busy
MCB_STC_NOTINIT	0x88	Service is not initialized

3.10 Protocolo UART

Neste projeto o protocolo usado na comunicação entre o PIC18F458 e o MC3PHAC foi o UART. Este protocolo remonta a 1969 quando a EIA (*Electronics Industries Association*) definiu-o pela primeira vez como UART (*Universal Asynchronous*

Receiver/Transmitter). Ao longo das últimas décadas este protocolo tem vindo a evoluir e sendo utilizado nos mais diversos equipamentos. Até há algum tempo atrás todos os computadores tinham integrada uma porta de comunicação UART, vulgarmente chamada de porta série. Na indústria é largamente usado, devido a sua baixa complexidade consegue-se assim ligar computadores a equipamentos de entradas/ saídas com relativo baixo custo. Esta interligação é feita através de fichas do tipo DB9 ou DB25, podendo as ligações serem feitas do tipo cruzado ou direto.

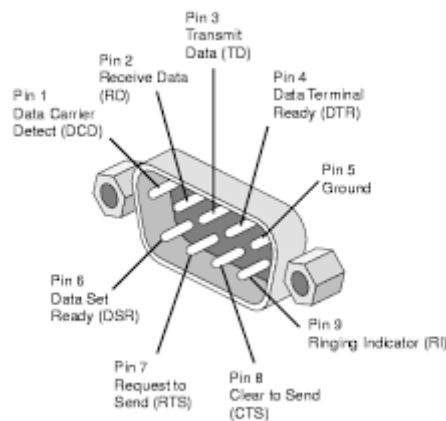


Figura 42: Ficha do tipo DB9

Atualmente a última versão do protocolo UART é a TIA/EIA(RS232-F) de 1997.

Surgindo no mercado em 1987 o MAX232 é um circuito bastante conhecido por converter o protocolo de comunicação USB em comunicação UART [1]

Utilizada em comunicação entre DTE (tipicamente um computador) e um DCE (autómato programável). Como dito anteriormente a interface de comunicação utiliza fichas do tipo DB9 ou DB25.

A transferência de dados no protocolo UART obedece a determinadas regras, regras essas que são descritas seguidamente: todas as mensagens enviadas são constituídas por um *start bit* sendo os dados a transmitir nos seguintes 8 ou 9 *bits* e por fim um *stop bit* é enviado a confirmar o fim de mensagem, ao *start* e *stop bit* damos a designação de bits de sincronização de dados, já aos restantes bits designamos de data bits. De forma a garantir a exatidão dos dados transmitidos é também enviado um byte de *checksum* que confere os dados enviados. Estes dados tem como função confirmar a veracidade dos dados, caso haja incongruência entre os dados enviados e o *checksum* os dados não são interpretados gerando erro. Taxa de

transmissão ou baud rate consiste na medida feita para o envio de bits por segundo (*bps*). Dependendo do equipamento podemos ter várias taxas de transmissão, a mais usual é a 9600 *bps*

-Os dispositivos necessitam de uma alimentação externa de forma a cumprir o protocolo de comunicações.

A correspondência das interfaces é a seguinte [1]:

- TXD* (Transmitted Data) Transmissão de dados (circuito de dados)
- RXD* (Received Data) Receção de dados (circuito de dados)
- SG* (Ground) Sinal de massa)
- RTS* (Request To Send) Pedido para transmitir (circuito de controlo de fluxo de dados)
- CTS* (Clear to send) Pronto a transmitir (circuito de controlo de fluxo de dados)
- DSR* (Data set Ready) Dados pronto (circuito de controlo de fluxo de dados)
- DTR* (Data Terminal Ready) Terminal de Dados Pronto (circuito de controlo de fluxo de dados)
- DCD* (Data Carrier Detect) deteção da portadora (circuito de controlo do modem)
- RI* (Ring Indicator) Indicador de chamada

3.10.1 Cálculo do checksum

Em comunicação os dados ao serem transmitidos/recebidos podem sofrer alterações, devido a ruído perturbação etc. Assim, para garantir a correta transmissão/receção dos dados recorre-se à funcionalidade de *check sum*.

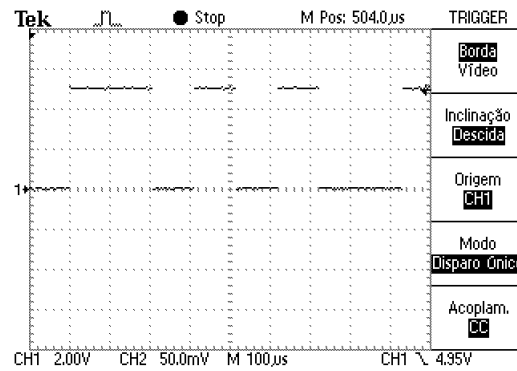


Figura 43: Comando de start enviado via UART

Neste projeto o *checksum* recorre à técnica do complemento para dois. É somado todos os bytes após o início de mensagem, subtrai-se a unidade ao valor da soma, por fim nega-se o este último valor. O *checksum* é o byte resultante deste cálculo.

Exemplo do cálculo para o comando *Forward*:

2b E3 10 00 10 00 FD

$$11100011 + 00010000 + 00000000 + 00010000 + 00000000 = 00000011 \quad (70)$$

Ao resultado aplico o complemento para 2 ao resultado ficando 11111101 este valor em hexadecimal corresponde ao *checksum* FD.

4. Arquitetura Implementada

O desenvolvimento deste projeto teve como base o desenvolvimento de um kit de transformação, isto é um kit de conversão elétrica a aplicar num veículo automóvel de combustão interna.

Foi desenvolvido um inversor que será o responsável por alimentar o motor elétrico do veículo ao mesmo tempo que lhe proporciona a variação de velocidade no motor elétrico.

Dimensionado um conversor DC/DC *boost* , que a partir do pack de baterias instalado no veículo alimentará o inversor eletrónico.

4.1 Protocolo UART

Como foi dito anteriormente este projeto é composto por dois microcontroladores, a comunicação entre ambos é feita utilizando o protocolo UART. As especificações deste protocolo consistem em um *baud rate* de 9600 *bps* em modo *Half-duplex* . O pacote de dados é composto por um *start bit* oito *bits* de dados e um *stop bit* .

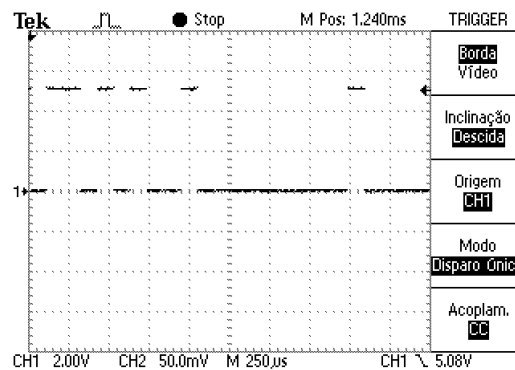


Figura 44: Resposta vinda do MC3PHAC ao comando de *start*

4.2 O inversor SPWM

O inversor *SPWM* é talvez um dos mais utilizados na indústria. O inversor trifásico utilizando a técnica de *SPWM* tem vantagens e desvantagens. O tipo de controlo aplicado neste tipo de inversor é relativamente simples e fácil de implementar, mas os harmónicos de baixa ordem, criam na forma de onda da corrente uma grande distorção, esta desvantagem pode ser atenuada recorrendo a filtros passa baixo. [26]

A construção deste tipo de conversores é utilizada a eletrônica de potência, para que esta funcione a utilização de *PWM* é uma das opções que quem desenvolve este tipo de equipamentos recorre.

O princípio de funcionamento da técnica *SPWM* consiste em comparar uma forma de onda sinusoidal com uma onda triangular [26]

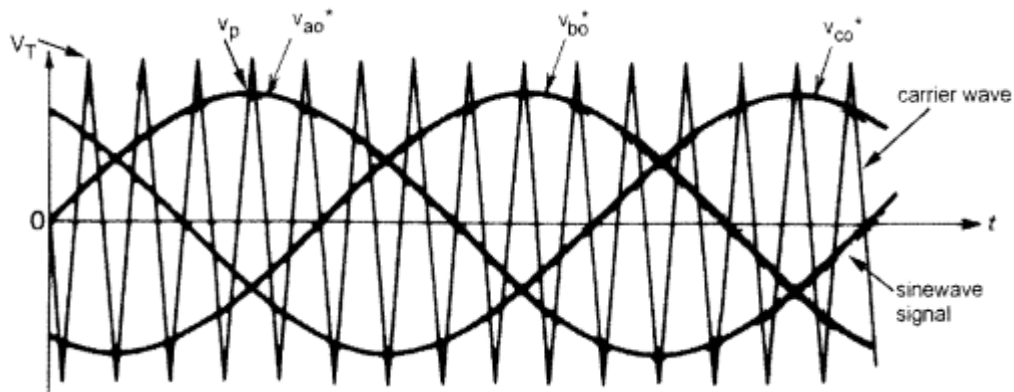


Figura 45:Obtenção dos sinais SPWM

A interceção de ambas as ondas cria os pontos de interceção, estes pontos são os pontos de comutação do inversor.

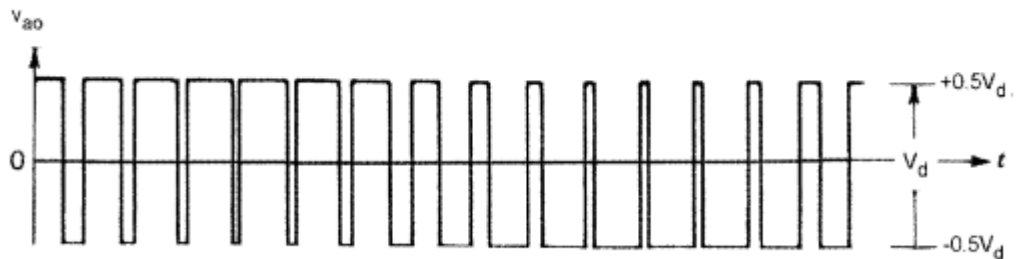


Figura 46: Sinais de SPWM

Com este tipo de comutação as formas de onda que saem do inversor SPWM tem a formam apresentadas na figura 46.

Neste projeto como já foi descrito, o circuito integrado MC3PHAC gera estes sinais de *PWM*, que são aplicados nas gates dos mosfets, estes sinais gerados tem por base a filosofia *SPWM*.

5. Testes

Seguidamente são apresentados os resultados obtidos após o desenvolvimento deste inversor os resultados obtidos foram muito satisfatórios.

Os primeiros testes foram feitos ainda com os transístores IR640 (referenciado no capítulo 3.5.1) que seguidamente são apresentados.

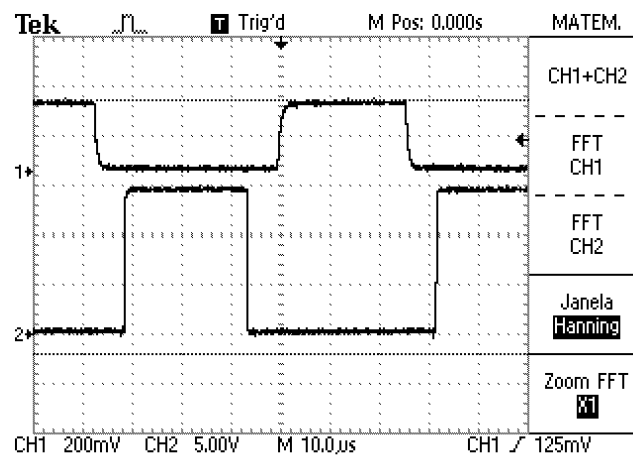


Figura 47: Sinais de gate nos mosfet

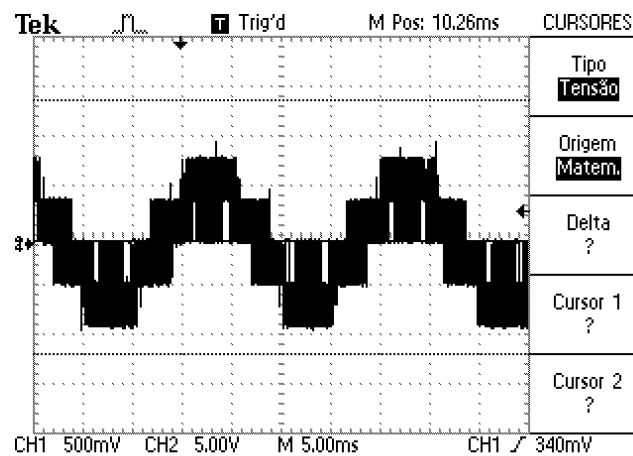


Figura 48: Tensão na carga com a ligação em triângulo nos 50Hz

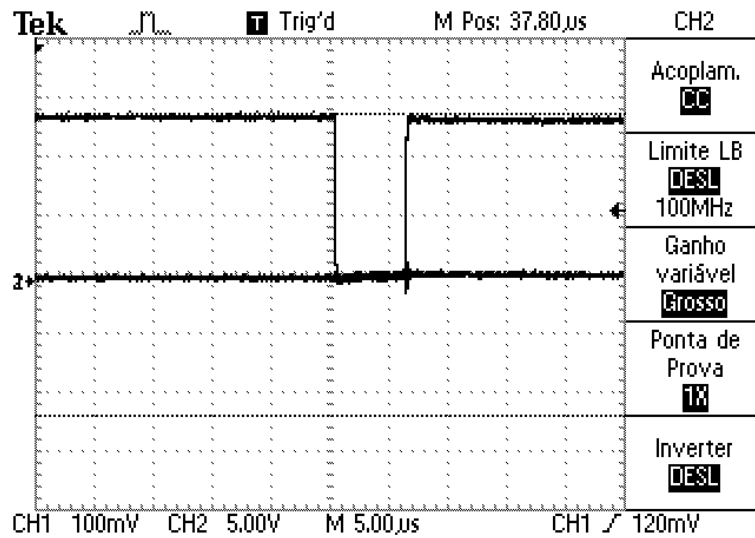


Figura 49:

Desfasamento no sinal das gates do mosfet hi/mosfet low com a ligação em triângulo

Como o objetivo deste inversor é aplica-lo a um motor de indução trifásico de potência de 30kw o pack de potência teria de suportar este upgrade de potência como descrito no capítulo 3.5.1 os mosfet utilizador foram os BUK438W 800A

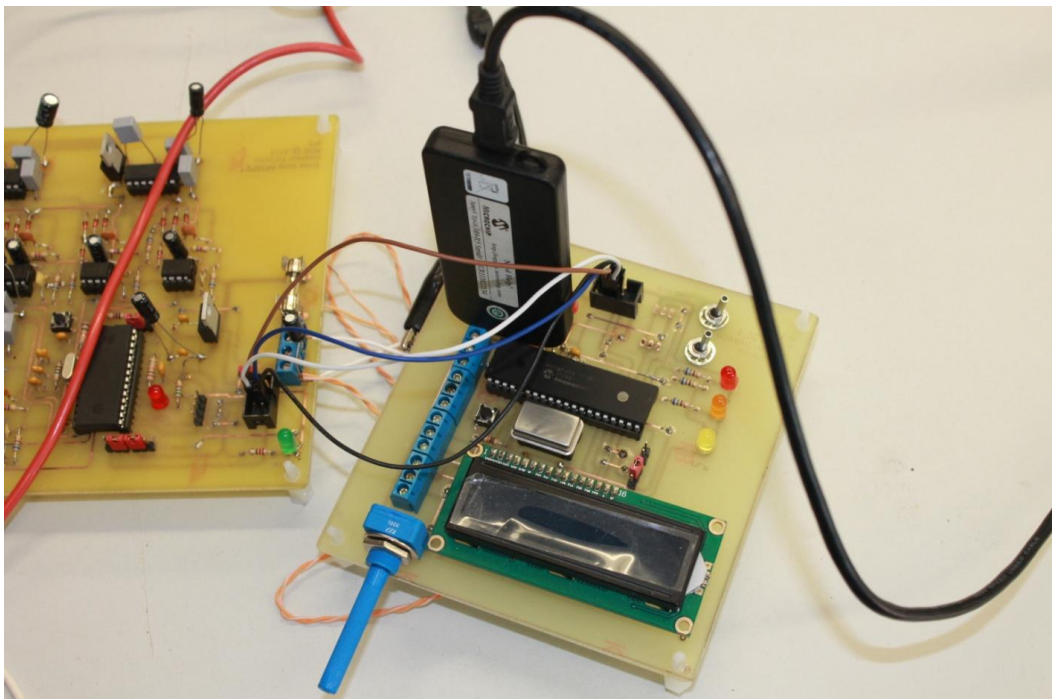


Figura 50: Programação do PIC18F458 com PicKit2

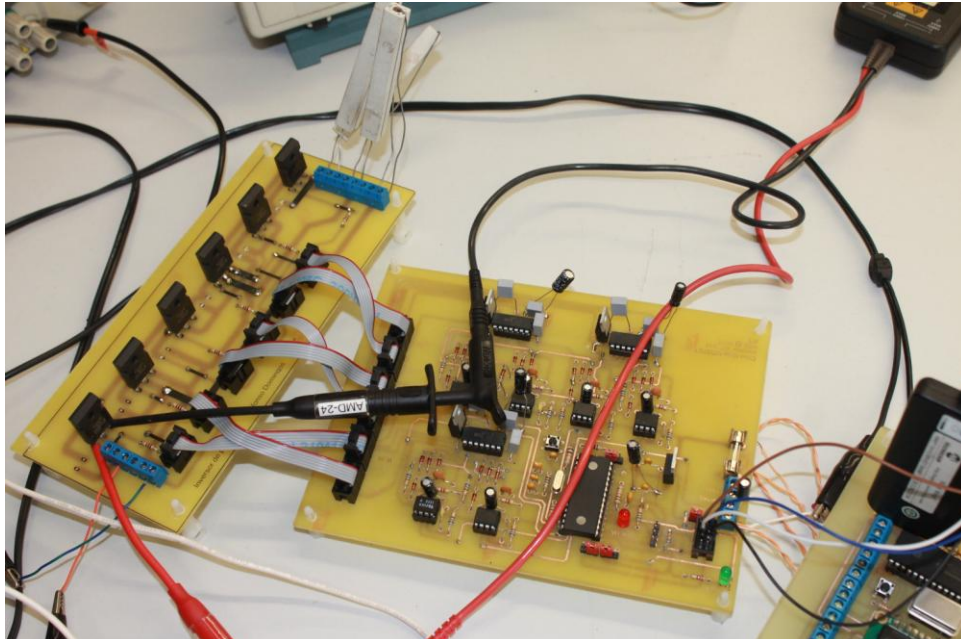


Figura 51: Placa de controlo e placa do inversor

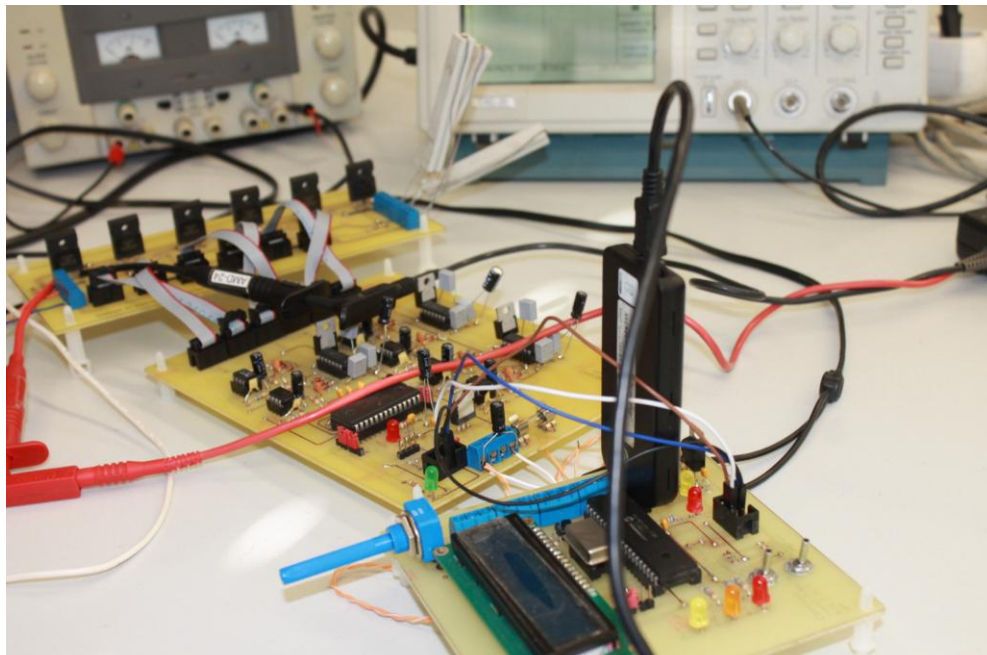


Figura 52: Vista global do inversor

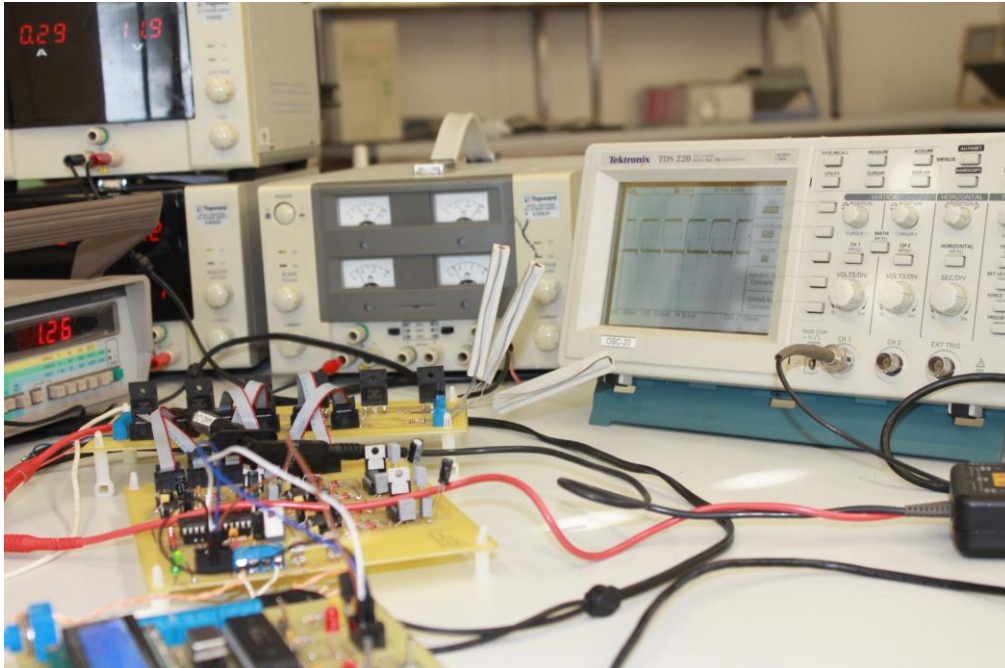


Figura 53: Inversor em funcionamento

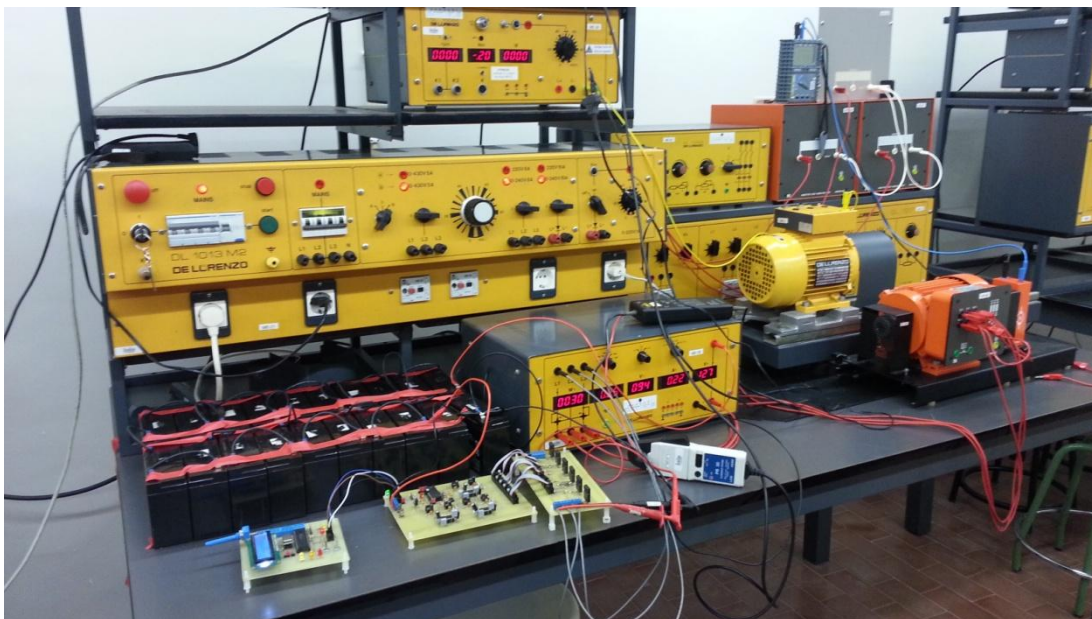


Figura 54: Ensaio com máquina assíncrona de indução trifásica

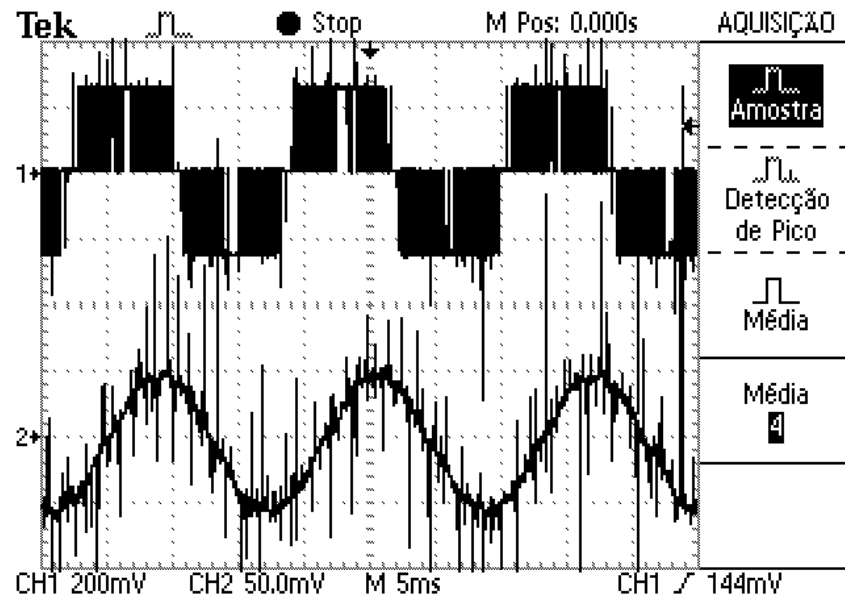


Figura 55: Ligação em triângulo máquina as 3500 rpm

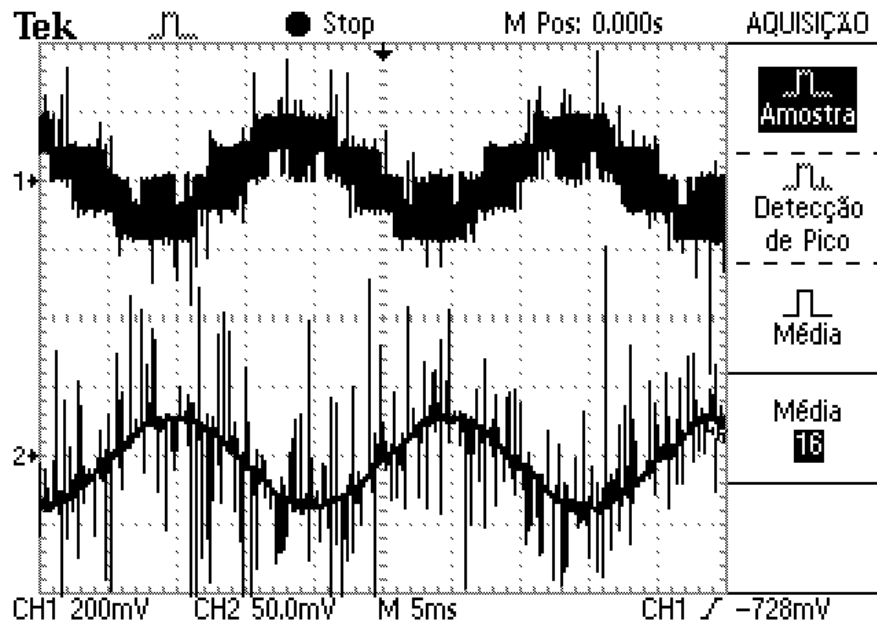


Figura 56: Tensão neutro fase maquina ligação em estrela as 3000rpm

As figuras 55 e 56, foram obtidas com ensaios numa maquina assíncrona trifásica de 1 kW , 2780 rpm.

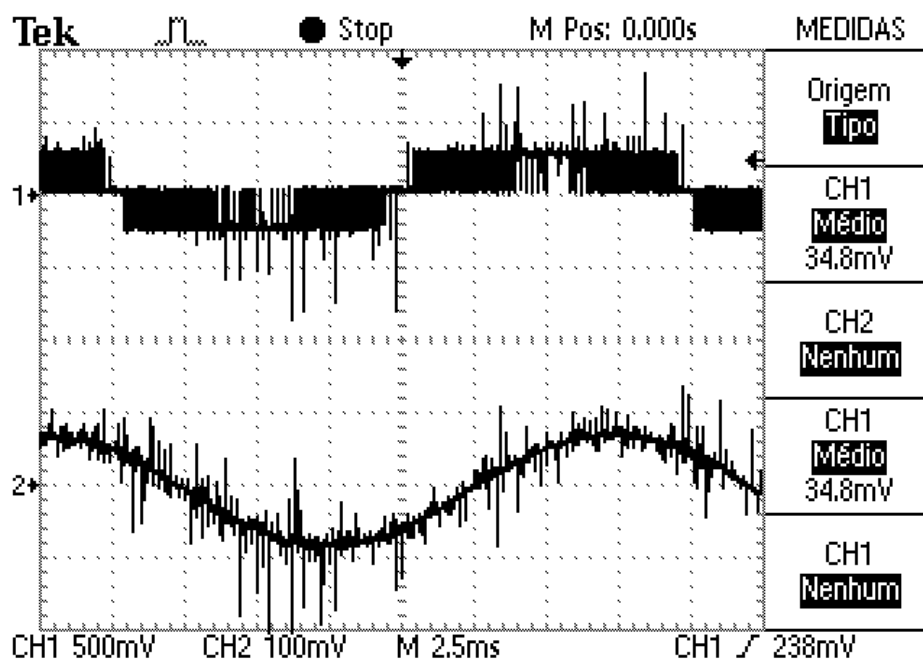


Figura 57 : Ligação do inversor numa carga RL

Nas imagens seguintes verifica-se o envio do comando de *start* (figura 58) e posterior resposta do MC3PHAC a informar que o comando foi recebido com sucesso (figura 59 e figura 60)

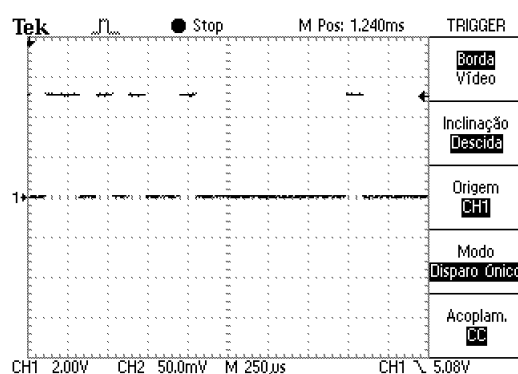


Figura 58: Envio do comando de start via comunicação UART

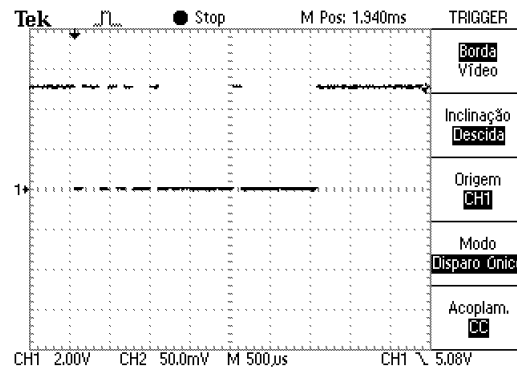


Figura 59: Resposta do MC3PHAC via UART

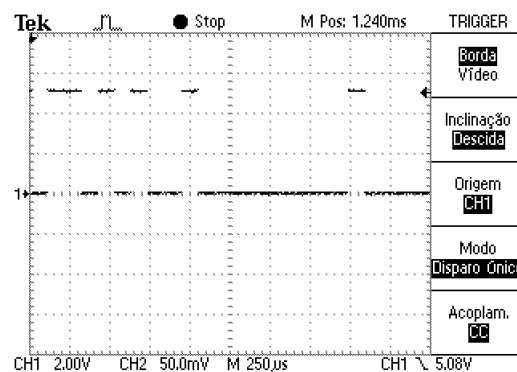


Figura 60: Resposta em detalhe ao comando de start

5.1 Modo de operação

Neste conceção existem três placas de circuito impresso.

Uma placa de controlo e gestão de todos os sistemas ao redor do inversor. Esta placa tem o microcontrolador PIC18F458 que fica encarregue da leitura da entrada analógica vinda do pedal de acelerador, do sentido que o utilizador pretende e o envio para um LCD informação acerca do estado do inversor. Está contemplado uma entrada analógica que permitirá obter uma leitura da temperatura do dissipador do inversor, posteriormente uma saída de *PWM* acionará um ventilador.

Uma placa que recebe os comandos oriundos da placa de controlo e gestão. Esta placa tem o microcontrolador MC3PHAC que após receção dos comandos interpreta-os gerando os sinais de gates para os Mosfet. Estes sinais passam por acopladores óticos, estes têm por funcionalidade criar isolamento galvânico entre o circuito de potência e o circuito de controlo prevenindo desta forma em caso de falha no circuito de proteção esta falha não se propagar ao

circuito de controlo, destruindo este. Por fim e ainda nesta placa o sinais de gate são tratados por circuitos de drive de Mosfet até que são por fim entregues aos Mosfet.

O último passo fica entregue ao *pack* de potência, este é o responsável por a partir de uma tensão de componente contínua transforma-la em alternada sinusoidal.

Nesta primeira fase de desenvolvimento as placas de circuito impresso apresentadas neste projeto foram desenvolvidas afim de testar a funcionalidade deste inversor.

A operação deste inversor é extremamente simples. Depois de estar presente a tensão no barramento *DC* o utilizador verifica qual o estado em que se encontra o inversor, se este não apresentar qualquer tipo de falha (led vermelho figura 61), o surgimento de uma falha pode ocorrer por uma definição incorreta de parâmetros de funcionamento (quebra de ligação UART durante o envio de comandos por exemplo)

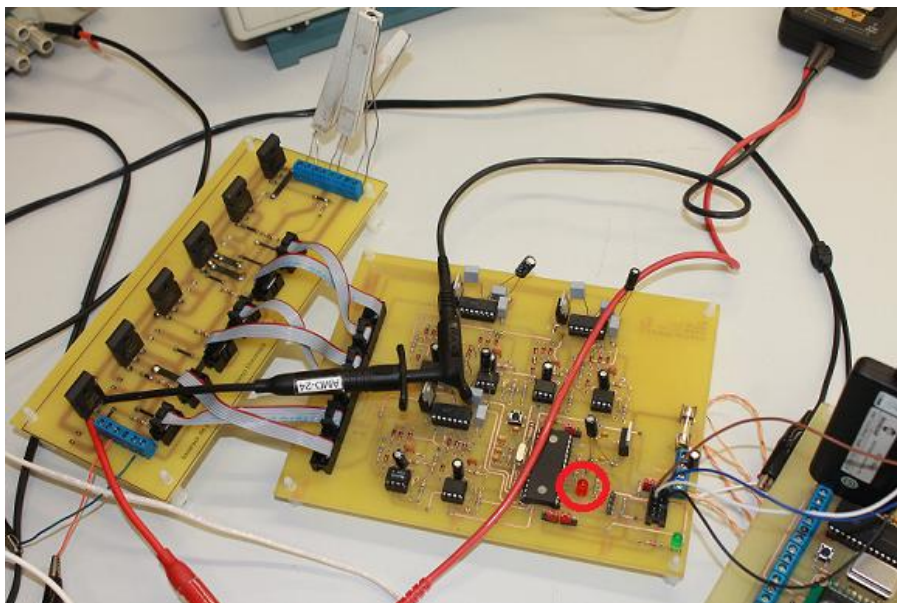


Figura 61: Falha da placa de controlo do inversor

Caso esta situação não se verifique estamos em condição para dar a ordem de arranque através do seletor de *RUN*, neste momento já são aplicados sinais ao *pack* de potência, mas estes ainda não são suficientes para que o motor assíncrono trifásico entre em movimento, acelerando (variando o potenciómetro) é enviada referência de velocidade ao MC3PHAC que fara o tratamento deste entregando-o ao *pack* de potência.

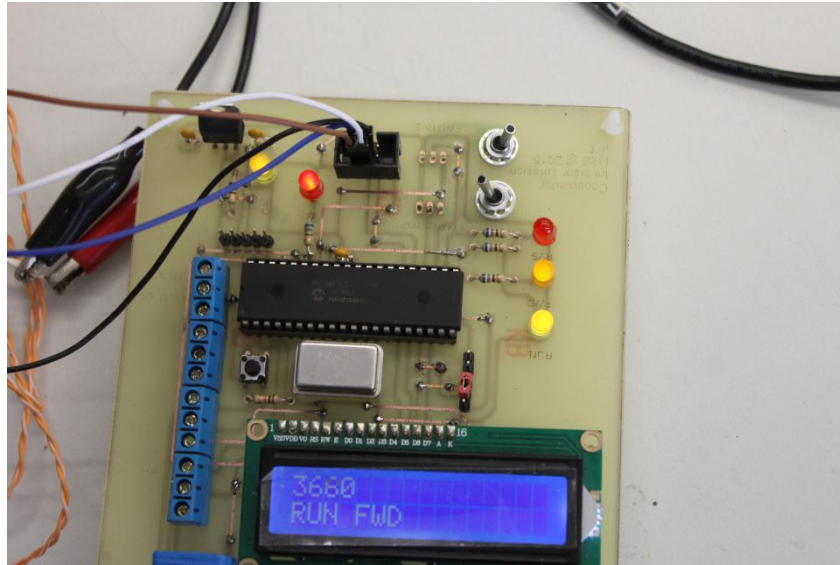


Figura 62: Conversor em funcionamento

A figura 62.demonstra o estado do inversor. Motor com rotação no sentido direto.

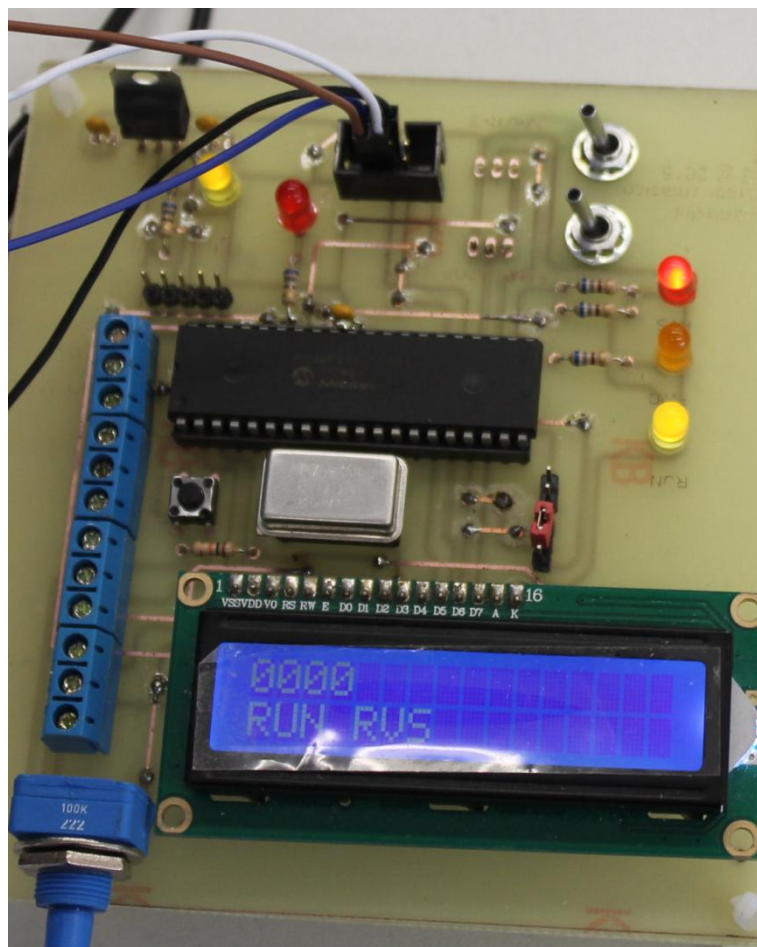


Figura 63: Detalhe da visualização dos comandos no LCD

Caso seja necessário a inversão do sentido e rotação o seletor de inversão terá de ser acionado. Na figura anterior o motor está com ordem de rotação em sentido de rotação invertido e com velocidade 0. Nesta situação o inversor apenas necessita de uma referência vinda do acelerador para que o motor inicie a rodar.

6. Conclusões e Trabalho Futuro

Com a execução deste projeto entende-se melhor como é feito e de que é feito um veículo elétrico. Toda a tecnologia que um VE tem integrado é de uma extrema complexidade sendo o acesso à informação muito diminuto, numa área desta natureza verificou-se que está quase exclusivamente reservada aos grandes construtores para salvaguardar os seus interesses. Sendo o desenvolvimento de um kit de conversão complexo, muitos aspetos são necessários a ter em conta, desde logo a potência necessária para que o veículo satisfaça o seu utilizador. Este projeto tem uma grande margem de evolução a começar logo pela regeneração de energia feita na desaceleração do veículo. Neste projeto apenas foi calculado valores dos componentes a utilizar num conversor *boost*, Uma das limitações deste conversor tem a ver com a particularidade de não ser reversível, portanto a energia fornecida pelo motor elétrico na travagem ou no movimento do plano inclinado (descida) não retorna às baterias. Dado que o mercado hoje em dia é tão extenso em equipamento uma outra possibilidade passaria por utilizar um motor assíncrono trifásico em gaiola que operasse a valores de tensão mais reduzida, com esta solução o uso do conversor DC/DC deixava de ser necessário.

De início foi equacionada a tentativa de recriar os sinais de *PWM* a aplicar no inversor gerado por um PIC18F. Esta solução rapidamente se percebeu que não iria resultar pois para a geração destes sinais é necessário também criar um tempo “morto” entre o comutar o transistor superior e o comutar do transistor inferior, caso o e ligar e desligar fosse simultâneo dado o atraso à resposta dos transístores poderia ocorrer um curto-circuito no barramento *DC*.

Assim optou-se por utilizar o microcontrolador MC3PHAC para gerar estes sinais.

Melhorar toda a interface de utilizador tornando-a mais amigável do utilizador. O acesso ao estado do veículo por intermédio da ligação via *smartphone*, introdução de tecnologia GPS possibilidade de integração de módulo de comunicação via *internet* possibilitante a ligação remota ao veículo. Aplicar um sistema de estacionamento automático seria também um aspeto interessante a desenvolver neste veículo.

Faltou referenciar uma área muito importante, a carga de bateria. Apesar de já existir no mercado soluções, estão são caras. Seria interessante o desenvolver de um sistema do tipo *BMS (battery management system)*.

7 Referências

- [1] Cunha Jorge “Desenvolvimento de um sistema de estacionamento automático” Tese de Mestrado ESTT IPT
- [2] Implementing a Bidirectional Wireless UART Application With TRF6903 and MSP430
- [3] Ali Emadi Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives
- [4] Datasheet MC3PHAC Monolithic Intelligent Motor Controller Freescale semiconductor Rev. 2, 7/2005
- [5] Appllication Note 2202/D *Creating a Graphical User Interface (GUI) for the MC3PHAC*
- [6] Application Note 2471 3/2003 *PC Master Software Communication Protocol Specification*
- [7] David Wilson “Using the MC3PHAC Motor Controller”
- [8] M. A. Latif, M. J. Alam, M. A. Rashid, A. Karim, N. H. Ramly, I. Daut “Microcontroller based PWM Inverter for Speed Control of a Three Phase Induction Motor”
- [9] Manual do utilizador MikroElektronika MikroC Pro for Pic
- [10] Jonathan Adams “Bootstrap Component Selection For Control IC’s”
- [11] Application Note 6076 Design and application guide of bootstrap circuit for High-Voltage gate-drive IC
- [12] Appllication Note 978-b HV Floating Mos-drive gate IC
- [13] APVE “Normalização do veículo elétrico” 05-11-2015
- [14] Seth Leitman Bob Brant “Build Your Own Electric Vehicle” Second Edition
- [15] IMTT Aspetos Dinâmicos Dos Veículos
- [16] Haitham Abu-Rub Texas A&M University at Qatar, Atif Iqbal Qatar University, Qatar and Aligarh Muslim University, Jaroslaw Guzinski Gdansk University of Technology, Poland “high performance control of ac drives with matlab/simulink models”
- [17] Eric Monmasson “Power Electronic Converters *PWM Strategies and Current Control Techniques*” ISTE Ltd 2011
- [18] Alioto Massimo Palumo Gaetano “Model and design of Bipolar and Mos Current-Mode Logic” Springer 2005
- [19] Mohan Ned “Power Electronics” [20] R. Krishnan “Electric Motor Drives Modeling, Analysis and Control” Prentice Hall 2001

- [20] MOHAMED ASSAF, D. SESHACHALAM, D. CHANDRA, R. K. TRIPATHI DC-DC CONVERTERS VIA MATLAB/SIMULINK I Electrical Engineering Department Motilal Nehru National Institute of Technology
- [21] Sul Seung-Ki “Control of Electric Machine Drive Systems” IEE press 2011
- [22] Herman Stephen “Alternating Current Fundamentals” DELMAR 2007
- [23] K. Vinoth Kumar, Prawin Angel Michael, Joseph P. John and Dr. S. Suresh Kumar “simulation and comparison of spwm and svpwm control for three phase inverter”
- [24] Jani Yashvant “Implementing Embedded Speed Control for AC Induction Motors”
- [25] A.E. Fitzgerald Charls Kingsley jr Stephen D. Umans “Electric Machinery Control 6th Edition” MCGrawHill
- [26] Bimal . Bose “Modern Power Electronics and AC Drives” Prentice Hall 2002
- [27] Bogdan M. Wilamowski J. david Irwin “Power electronics and motor drives”
- [28] Microchip Pic 18F458 Datasheet
www.microchip.com/downloads/en/devicedoc/41159d.pdf
- [29] Rogério Gonzalez “Projeto de uma viatura fórmula elétrica” FEUP
- [30] Mohamed Assaf, D. Seshachalam, D. Chandra, R. K. Tripathi “dc-dc converters via matlab/simulink”
- [31] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/42132-boost-converter---simulink-model-using-matlab-embedded-function>
- [32] Pedro Espinheira Rio “Dinâmica e afinação de uma viatura de competição” FEUP
- [33] USART and Asynchronous Communication NET School paper.
- [34] Tiago Ramos “Sistema de tração de um VEC (Veículo Elétrico de Competição) ” FEUP 2011
- [35] Daniel Magalhães “Projeto de um sistema de gestão de baterias (BMS) aplicadas na alimentação de Veículos Elétricos (EVs)” FEUP
- [36] Greg Archer “Electric Vehicles in 2013:a Progress Report” Transport and Environment
- [37] Luís Silva “Estratégia Nacional para a Energia (ENE 2020)” ADENE
- [38] globalevoutlook 2013
- [39] http://www.teslamotors.com/en_GB/?redirect=no
- [40] http://www.e-transportation.eu/catalog/product.php?id_product=80 acedido a 18-01-2011

- [41]- Antip Ghosh State-space average Modeling of DC-DC Converters with parasitic in Discontinuous Conduction Mode (DCM)”
- [42] Voltage Mode Boost Converter Small Signal Control Loop Analysis Using the TPS61030 Application Note SLVA 274A TI
- [43] “A State Space Modeling of non-ideal DC-DC converters” Dep. Electrical Eng. Korea Advanced Institute of Science and Technology
- [44] Optima yellow top datasheet
- [45] Optima yellow top Battery model D34/78
https://d26maze4pb6to3.cloudfront.net/optimabatteries/4713/4583/5068/YELLOWTOP_Full_Specs_Sheet.pdf
- [46] Tiago Rocha “Sistema de Alimentação de um VEC (Veículo Elétrico de Competição)” FEUP 2011
- [47] Manual de instruções *Seat Marbella*
- [48] Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage TI SLVA372C 2009
- [49] A. Merello, A. Rugginenti and M. Grasso “Using Monolithic High Voltage”, International rectifier
- [50] “Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM” Guia Técnico WEG
- [51] M. Sai Krishna Reddy, Ch. Kalyani, M. Uthra and D. Elangovan “A Small Signal Analysis of DC-DC Boost Converter” ISSN (Online) : 0974-5645
- [52] Kevin Fronczak “Stability analysis of switched dc-dc boost converters for integrated circuits” 2013
- [53] Luís Pombo “Avaliação de metodologias de otimização energética em veículos elétricos de proximidade” FEUP 2009
- [54] Hugo Pestana, Hugo Guilherme, Motociclo Elétrico- Projeto e conceção de um protótipo industrial de um Motociclo Elétrico

8 Anexos

8.1 Comunicação com o MC3PHAC utilizando o PICKIT

->>1º Reset

2b E3 10 00 30 00 DD

->>2º set PWM dead time

2b E3 00 36 30 00 B7

->>3º set PWM

2b e3 10 00 50 00

->>4º set pwm frequency vamos por 44->15.9kHz

2b e3 10 00 44 00 c9

ler PWM period

2b d1 00 A8 87

->>5º set base freq

2b e3 10 00 61 00 AC tenho de enviar assim 61 00-> 61-50Hz

->6º set acc

2b e4 00 60 12 00 AA depois de enviar este ele respondeu 18-02-2015

->7ºset speed depois de enviar este ele respondeu 18-02-2015

2b e4 00 62 60 00 5A

2b e4 00 62 10 00 AA depois de isto enviado a resposta ao set up register é

2B 00 EC 14 -> 11101100

8.2 Código utilizado no PIC18F458 para comunicar com o MC3PHAC

```
#define Lo(analogic) ((char *)&analogic)[0]
```

```
#define Hi(param) ((char *)&param)[1]
```

```
//configuração do LCD
```

```
sbit LCD_RS at RB3_bit;
```

```
sbit LCD_EN at RB4_bit;
```

```
sbit LCD_D4 at RC0_bit;
```

```
sbit LCD_D5 at RC1_bit;
sbit LCD_D6 at RC2_bit;
sbit LCD_D7 at RC3_bit;
```

```
sbit LCD_RS_Direction at TRISB3_bit;
sbit LCD_EN_Direction at TRISB4_bit;
sbit LCD_D4_Direction at TRISC0_bit;
sbit LCD_D5_Direction at TRISC1_bit;
sbit LCD_D6_Direction at TRISC2_bit;
sbit LCD_D7_Direction at TRISC3_bit;
//fim de configuração do lcd
```

```
// configuração do mc3phac
```

```
int RESET[7] = {0x2b, 0xE3, 0x10, 0x00, 0x30, 0x00, 0xDD}; // comando de reset
// 2b E3 10 00 30 00 DD
```

```
int FORW[7] = {0x2b, 0xE3, 0x10, 0x00, 0x10, 0x00, 0xFD}; // " forward "
// 2b e3 10 00 10 00 Fd
```

```
int STOP[7] = {0x2b, 0xE3, 0x10, 0x00, 0x20, 0x00, 0xED}; // " stop "
```

```
int SET_DEADTIME[7] = {0x2b, 0xe3, 0x00, 0x36, 0x30, 0x00, 0xb7}; //faz o dead time
entre o desliga e liga das gates
```

```
int SET_PWM_POLARITY[7]={0x2b, 0xe3, 0x10, 0x00, 0x50, 0x00, 0xBD}; //faz a
polaridade do pwm
```

```
int SET_PWM_FREQ[7] = {0x2b, 0xe3, 0x10, 0x00, 0x42, 0x00, 0xCB}; // define a
frequencia do sinal de pwm
```

```
int SET_BASE_FREQ[7] = {0x2b, 0xe3, 0x10, 0x00, 0x61, 0x00, 0xAC}; //frequência base
61-> 50Hz
```

```
int SET_ACC[7] = {0x2b, 0xe4, 0x00, 0x60, 0x12, 0x00, 0xAA}; //tempo para acelerar
de 0 as rpm definidas
```

```
int SET_SPEED[7] = {0x2b, 0xe4, 0x00, 0x62, 0x60, 0x00, 0x5A}; //velocidade do motor,
este valor está entre 0x0000 e 0x7fff, para o check sum apenas tenho de calcular o lido do
potênciometro e fazer o calculo.
```

```
int REV[7] = {0x2b, 0xE3, 0x10, 0x00, 0x11, 0x00, 0xFC}; // " reverse "
```



```
//leitura do seu estado
```

```
int READ_SETUP[5] = {0x2B, 0xd0, 0x00, 0xae, 0x82}; //lê o set up
int READ_STATUS[5] = {0x2B, 0xd0, 0x00, 0xC8, 0x68};
```

```
int i=0,x=0,ciclo=5;
int val,val1,val2, val3, val4,valac, analoglow, analoghi,valacum,veldif=0,hertz;
char acc[5], anlgchi[5], anlgclo[5],crc1[5],crc2[5];
char crc[5],crc3[4];
char hertz1[5];
```

```
bit oldstate;
bit arranc;
bit para;
bit direto;
bit inverso;
```

```
//-----//
//----- interrupção -----//
// interrupção está ok
//-----//
```

```
void interrupt() {
  if (TMR0IF_bit=1)
  {
    TMR0IF_bit = 0;          // clear TMR0IF

    TMR0H      = 0x3C;
    TMR0L      = 0xAF; //interrupção de 100ms ver isto mas parece que esta com 40ms
em vez dos 100ms
```

```
    PORTB.B2=~PORTB.B2;    // verificar se a interrupção se faz de 100ms em 100ms
```

```
    val=ADC_Read(0);      // lê o valor do ADC (0...1024)
    delay_ms(1);
    valac=val/10;          //"filtrar" valor do adc so para entrar dentro do ciclo if
```

```
    hertz = val/8;
```

```
    if (valac!=valacum)    // compara se o valor lido pelo analógico é diferente, para
depois entrar dentro do ciclo if
    {
      valacum=valac;        // atribui a valacum o valor de val
      veldif=1;             // vamos dizer que há alteração para no ciclo while enviar a nova
velocidade
```

```

    PORTC.B4=~PORTC.B4;
}

    delay_ms(10);          // analógico já esta a trabalhar.. 18-05-2015 pode-se por a
interrupção mais rápido
    val1=(val*255/1023);    // converte para 8 bits o ADC
    val=val*32;            // converte o valor do ADC para enviar para o mc3phac

    // várias conversões a serem feitas

    intToHex(val,acc);      // converte o valor do ADC em hexadecimal para o botão
de start trabalhar e o lcd tmb esta função tem de ficar aqui
    analoglow=Lo(val);     // valor low do analogico
    analoghi= Hi(val);     // valor hi do analogico
    val2=326+analoghi+analoglow; // calculo de val2 é inteiro ->calculo do checksum
consoante o analogico lido 326 é a soma em decimal de E4(hexa) + 62(hexa) convertido para
decimal
    val3=~val2;
    val3=val3+1;
    val4=Lo(val3);        // cálculo do checksum
    IntToHex(analoglow,anlgclo); // valor do analogico low
    IntToHex(analoghi,anlgchi); // valor do analogico hi

    IntToStr(hertz,hertz1); // converte o valor de velocidade em string

    //IntToHex(val2,crc);    //este comando apenas é para visualização no lcd
    //IntToHex(val3,crc1);   //este comando apenas é para visualização no lcd
    //IntToHex(val4,crc2);   //este comando apenas é para visualização no lcd

    SET_SPEED[4]=analoghi;  //como o Diogo sugeriu fazer e está a bombar
    SET_SPEED[5]=analoglow; //como o Diogo sugeriu fazer e está a bombar
    SET_SPEED[6]=val4;      //coloca o check sum

}

}

void mostralcld()
{
    Lcd_Out(1,1,acc);      // estou a apanhar o analógico de 0 a 1023
    delay_ms(15);
    Lcd_Out(1,6,hertz1); // mais significativo de acc
    //delay_ms(15);
    //Lcd_Out(1,11,anlgclo); // menos significativo de acc
    //delay_ms(15);
    //Lcd_Out(2,1,crc);    // valor da soma 2b+62+hi+lo

```

```

//delay_ms(15);
//Lcd_Out(2,6,crc1);// valor final do checksum
//delay_ms(15);
//Lcd_Out(2,11,crc2); // valor final do checksum
//delay_ms(15);
}

void Initialization()
{

INTCON    = 0b11100000;
PIR1.ADIF  = 0; // quer dizer que a conversão analógica não esta terminada ===== isto
é igual a isto PIR1.B6 = 0;
RCON.IPEN  = 0; //Habilita a prioridade nas interrupções mudei de 0 para 1      int1 a 1
habilita a prioridade
OSCCON     = 0x00;

CMCON |= 7;          // Disable comparators

ADCON0 = 0b00000001;          // permite a conversão ADC no canal 0 RA0/ANO
datasheet pag 241 estava ADCON0 = 0x01; 13-05-2015
ADCON1 = 0b10001110;

T0CON     = 0x81;
TMR0H     = 0x3C; //"carrega" o valor no timer0 para interrupção //TMR0 Preload =
64735; Actual Interrupt Time : 100ms
TMR0L     = 0xAF; //"carrega" o valor no timer0 para interrupção //TMR0 Preload =
64735; Actual Interrupt Time : 100ms

}

void main()
{
TRISA = 0b00000001; //para leitura do analógico
TRISB = 0x00; // define o porto B como saída
TRISC = 0xF0; // define o porto C como entrada/saída
TRISD = 0x00; // define o porto D como saída

UART1_Init(9600);          //Arranca com o baud rate do usart a 9600

oldstate = 0;
arranc = 1;
para = 0;
direto = 1;
inverso = 0;

```

```

Initialization(void);

ADC_Init();
delay_ms(5);

Lcd_Init();           // Initialize LCD
delay_ms(1);
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);  // Clear display
delay_ms(1);
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off
Lcd_Out(2,1,"Afonso"); // teste do LCD
delay_ms(10);
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);

//1 envio do reset
for(i=0;i<7;i++)
{
    UART1_Write(RESET[i]);
}
delay_ms(5);

//2 configuração do dead time
for(i=0;i<7;i++)
{
    UART1_Write(SET_DEADTIME[i]);
}
delay_ms(5);
// vamos por aqui um "if" se for igual ao resultado da recepção do uart prosseguimos

//3 configuração da polaridade do pwm
for(i=0;i<7;i++)
{
    UART1_Write(SET_PWM_POLARITY[i]);
}

//4 configuração da frequencia do sinal de pwm a 21.1kHz
for(i=0;i<7;i++)
{
    UART1_Write(SET_PWM_FREQ[i]);
}
delay_ms(5);

//5 configuração dos 50Hz
for(i=0;i<7;i++)
{
    UART1_Write(SET_BASE_FREQ[i]);
}
delay_ms(5);

```

```

//6 configuração da aceleração
for(i=0;i<7;i++)
{
    UART1_Write(SET_ACC[i]);
}
delay_ms(5);

//7 configuração da velocidade
for(i=0;i<7;i++)
{
    UART1_Write(SET_SPEED[i]);
}
delay_ms(5);

// comando de STOP para garantir que fica mesmo em STOP
for(i=0;i<7;i++)
{
    UART1_Write(STOP[i]);
}

delay_ms(100);

while(1)
{

//+++++
+++++//
//ordem de arranque

//+++++
+++++//
    if (Button(&PORTC, 5, 0, 1) && arranc)    // Detect logical one
    {
        PORTB.B0=1; //led de run on indicação de run
        PORTD.B2=1; //led de sentido directo on
        PORTD.B3=0; //led de sentido inverso off

        for(i=0;i<7;i++)
        {
            UART1_Write(FORW[i]);
        }

        oldstate = 1;
        arranc = 0;          // Update flag
        Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);    // Cursor off
        Lcd_Out(2,1,"RUN FWD");
    } //fim do ciclo do comando de start

```

```

//+++++
+++++//
        //ordem de paragem

//+++++
+++++//

if (oldstate && Button(&PORTC, 5, 1, 0))
{ // Detect one-to-zero transition

    PORTB.B0=0; //led de run off
    PORTD.B2=0; //led de sentido directo off
    PORTD.B3=0; //led de sentido inverso off

    for(i=0;i<7;i++)
    {
        UART1_Write(STOP[i]);
    }
    oldstate = 0;          // Update flag
    arranc = 1;
    Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off
    Lcd_Out(2,1,"STOP");
} // fim do ciclo de envio do comando de stop

//+++++
+++++//
        //visualização no lcd do analógico

//+++++
+++++//

    mostralcd(void);

//+++++
+++++//
        //actualização da velocidade

//+++++
+++++//

if(veldif) //actualiza a velocidade
{
    for(i=0;i<7;i++)
    {
        UART1_Write(SET_SPEED[i]);
    }
}

```

```

    }
    veldif=0;
} //fim do ciclo de atualização de velocidade

//+++++
+++++//
    //inversão do sentido de rotação

//+++++
+++++//
    if (Button(&PORTC, 4, 0, 1) && direto )    // Detect logical one
    {

        PORTD.B2=0;    //led de sentido directo off
        PORTD.B3=1;    //led de sentido inverso on

        for(i=0;i<7;i++)
        {
            UART1_Write(REV[i]);
        }

        inverso = 1;
        direto = 0;        // Update flag

        Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);        // Cursor off
        Lcd_Out(2,1,"RUN RVS");
    } //fim do ciclo do comando de start

//+++++
+++++//
    //retoma sentido normal

//+++++
+++++//

    if (inverso && Button(&PORTC, 4, 1, 0))
    {    // Detect one-to-zero transition

        PORTD.B2=1;    //led de run on indicação de run
        PORTD.B3=0;    //led de sentido directo on

        for(i=0;i<7;i++)
        {
            UART1_Write(FORW[i]);
        }
    }

```

```
    inverso = 0;           // Update flag
    direto = 1;
    Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off
    Lcd_Out(2,1,"RUN FWD");
} // fim do ciclo de envio do comando de stop

} // fim do ciclo while

} // fim do main
```


8.3 Placas eletrônicas do inversor

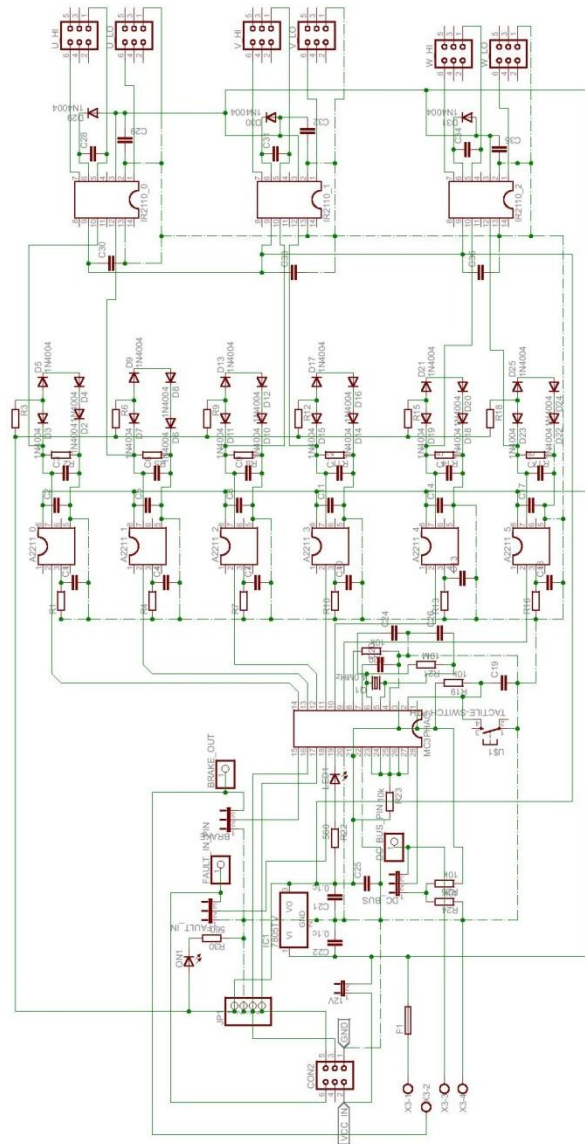


Figura 64: Placa geradora dos sinais de pwm para as gates dos mosfet

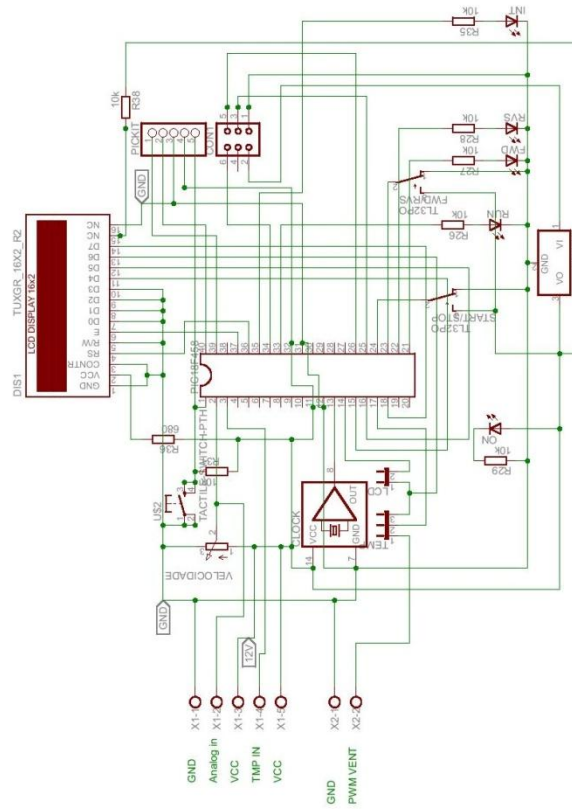


Figura 65: Placa de gestão do inversor microcontrolador PIC 18f458

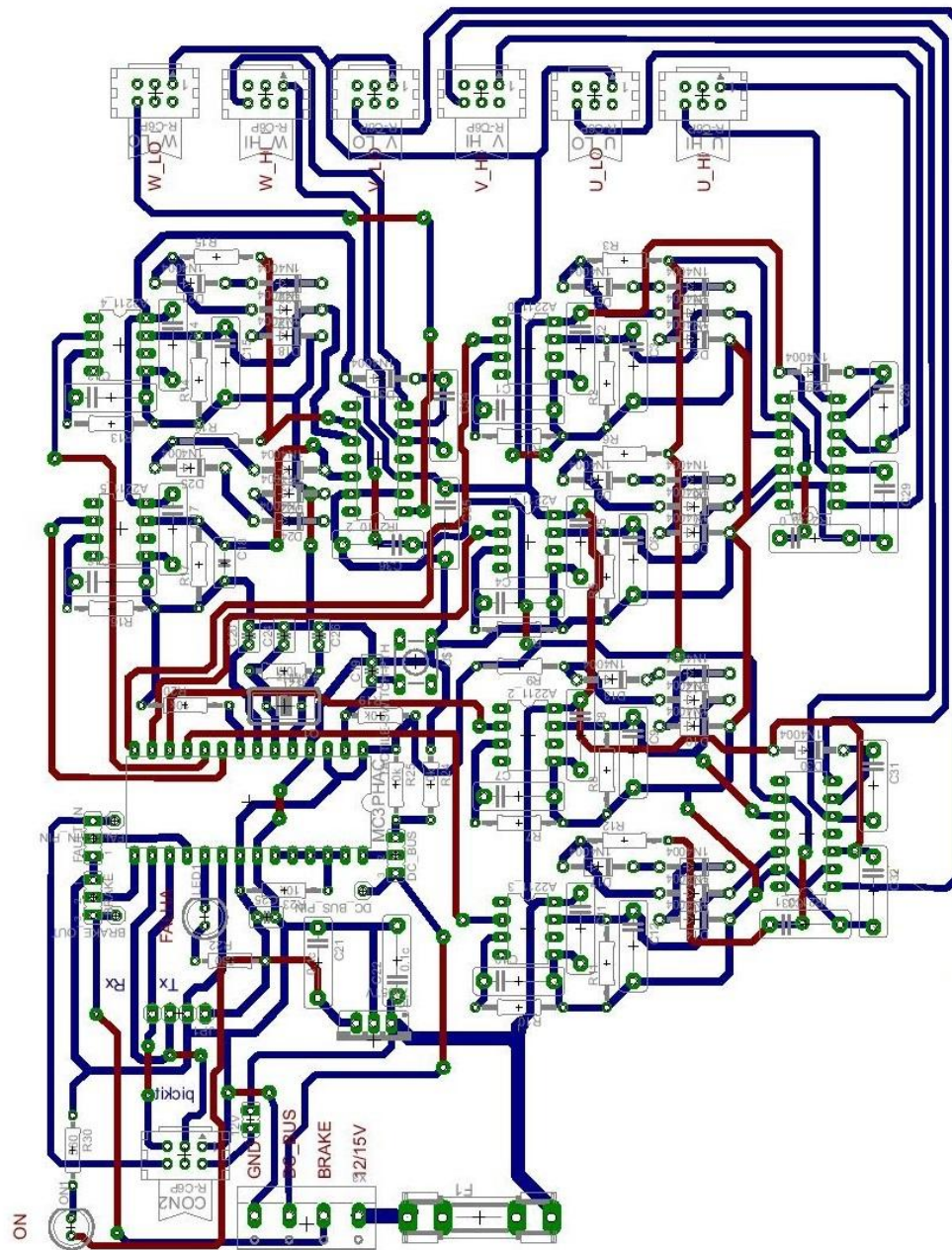


Figura 66: Placa de circuito impresso do circuito de controlo do inversor

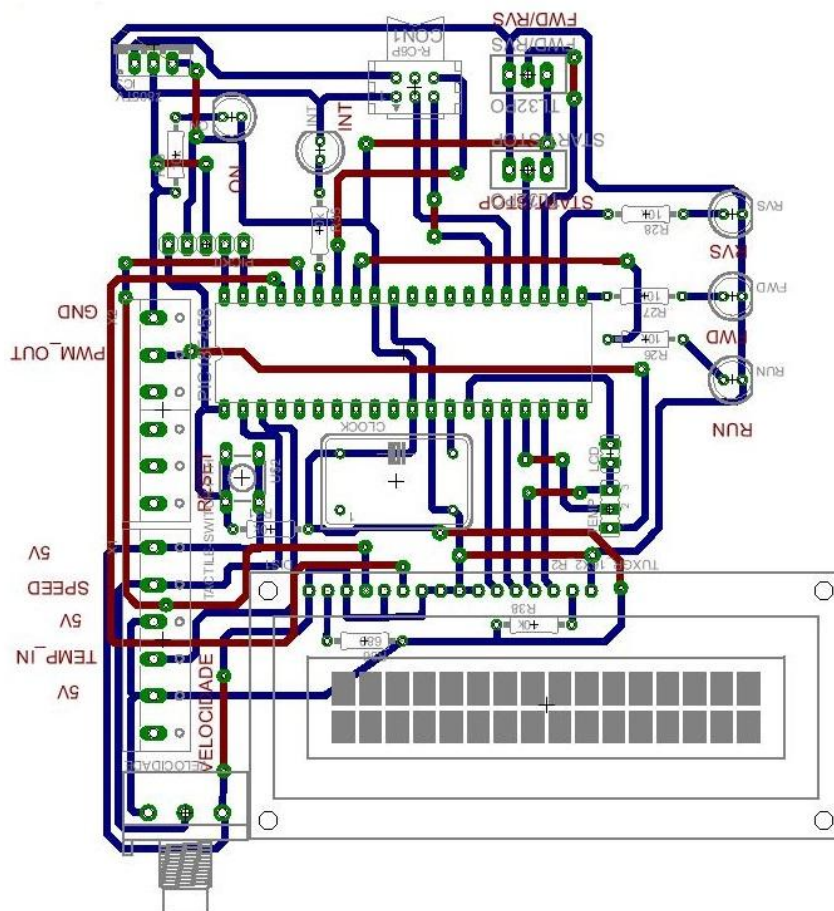


Figura 67: Placa do circuito impresso do sistema de gestão

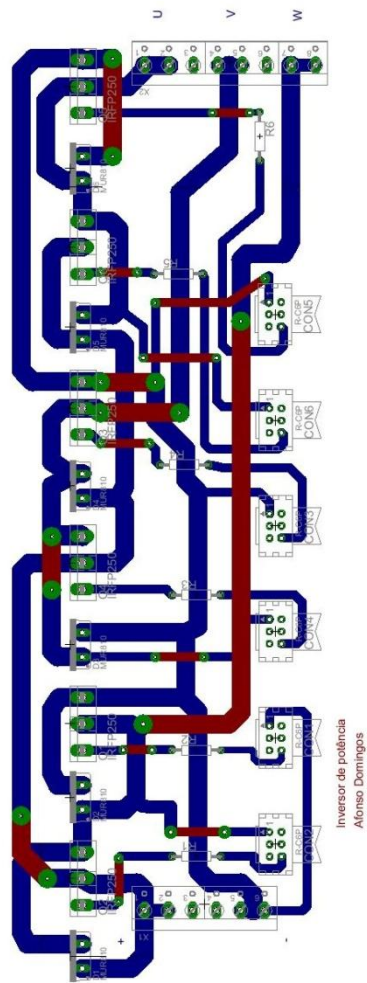


Figura 68: Placa do pack de potência do inversor